MICROCHIPS ASINCRONOS • PILDORAS CONTRA EL ENVEJECIMIENTO

INVESTIGACION y CIENCIA

OCTUBRE 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MATERIA OSCURA



Lenguas en peligro

Secuelas del terrorismo

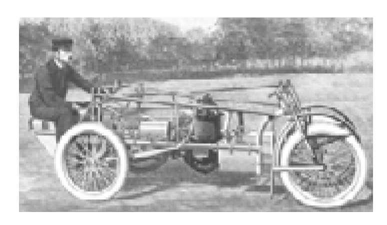
Cirugía egipcia

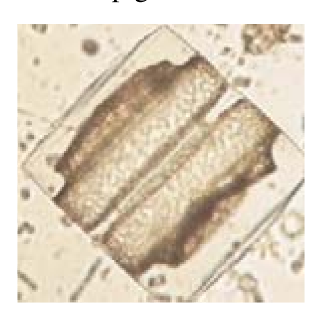
9 770210 136004 00313

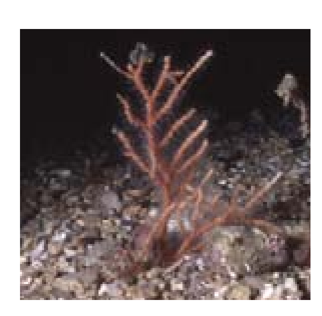


Octubre de 2002 Número 313

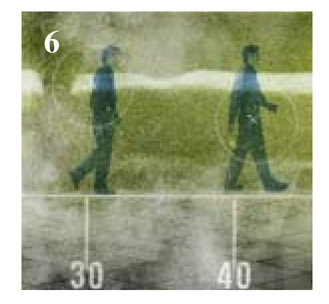
SECCIONES

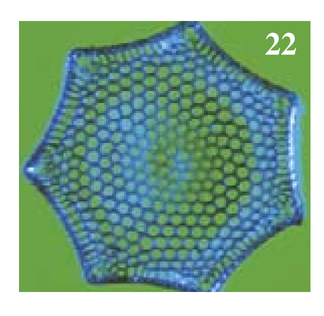












SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNACIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

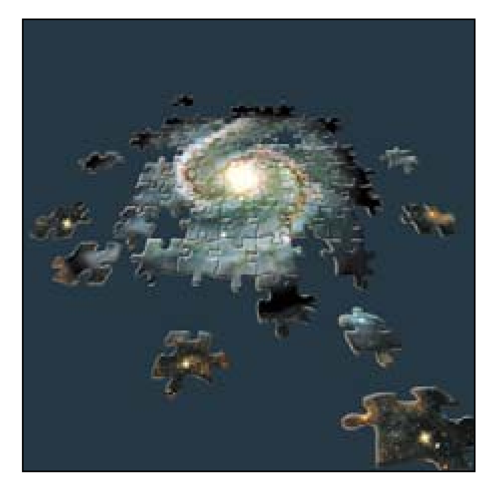
GM Publicidad
Menorca, 8, semisót., centro, izda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *Restricción calórica mimetizada*; M.ª Rosa Zapatero: *¿Existe realmente la materia oscura?*; Neus Vert: *El bosque invisible de los océanos*; José Manuel García de la Mora: *Del miedo y del terrorismo*; J. Vilardell: *La conservación de las lenguas moribundas*, *Apuntes*, *Hace* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Ordenadores sin reloj* y *Aventuras problemáticas*; Francesc Asensi: *La cirugía en el antiguo Egipto*; Angel Garcimartín: *Nexos*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Cleo Vilett, idea de Ron Miller

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

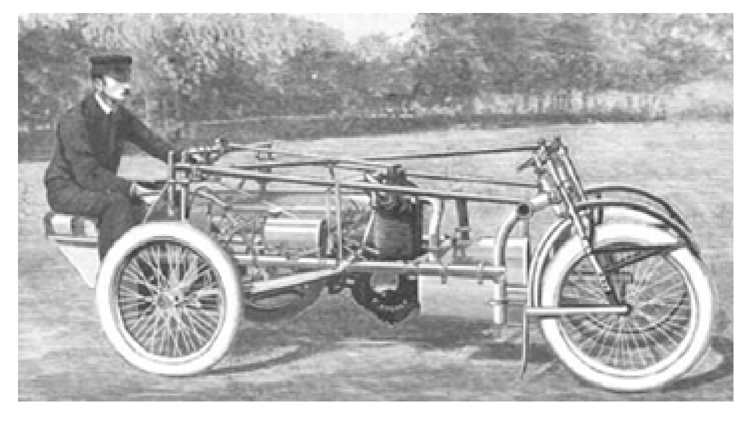
...cincuenta años

ASÍ MATA LA DIFTERIA. «La sustancia que secreta el bacilo de la difteria es uno de los venenos conocidos más potentes: un miligramo basta para matar 3,5 toneladas de conejillos de Indias. ¿Cómo actúa? Los resultados de los experimentos con el gusano de seda *Cecropia* han sido llamativos. Las pupas durmientes, que contienen poco citocromo, sobreviven a 70 microgramos de toxina durante más de cuatro semanas. Aún más impresionante es el efecto de la toxina en el *Cecropia* adulto en desarrollo. Aunque puede que la muerte no sobrevenga en días, el desarrollo del insecto se interrumpe en cosa de horas. Suponemos que la toxina de la difteria no actúa inhibiendo los componentes citocrómicos ya formados, sino impidiendo la síntesis de citocromo nuevo.»

...cien años

UNA TELEVISIÓN (MUY) PRIMITIVA. «Un ingeniero belga, cuyo nombre se desconoce, ha ideado un medio para ver eléctricamente a largas distancias tal y como oímos, eléctricamente, merced al teléfono. En la estación emisora un objetivo, que gira rápidamente, recorre en espiral cuarenta veces por segundo la superficie del cuerpo al que se halla expuesto. El objetivo está dotado de un diafragma de modo que sólo una pequeña porción de su superficie quede expuesta a la vez. En el eje de rotación se coloca un compuesto de selenio, cuya conductividad eléctrica varía según la intensidad de la luz que recibe. En la estación receptora hay un cuerpo conductor y otro objetivo, eléctricamente sincronizado con el primero. Se proyecta la imagen luminosa del cuerpo receptor siguiendo una espiral sobre una pantalla blanca.» [*Nota de la redacción: Parece tratarse de una versión práctica de la televisión electromecánica patentada en 1884 por el científico alemán Paul Gottlieb Nipkow.*]

AUTO DE CARRERAS. «La máquina Truffault está construida con la mayor simplicidad. Se la probó oficialmente en la carrera de los 1000 kilómetros de Deauville, donde consiguió una velocidad de 83 kilómetros por hora y se alzó con la victoria. En este modelo experimental el inventor ha intentado aliviar los terribles choques y sacudidas tan conocidos de todos los que han efectuado viajes largos en estos rápidos y livianos vehículos. Cabe esperar que no tarde, con algunas modificaciones, en ser industrializado.» [*Nota de la redacción: J. M. M. Truffault diseñó y usó uno de los primeros amortiguadores.*]



Auto de carreras Truffault: Modelo experimental de 1902

...ciento cincuenta años

ESTÓMAGOS DÉBILES. «La brecha que no se cierra en el estómago de un soldado canadiense debida a una bala de mosquete [sic], descrita por el señor William Beaumont, así como experimentos realizados con animales, prueban de manera irrefutable que el proceso de la digestión, en los animales que se asemejan al hombre por su organización, es el mismo tenga lugar la acción en un estómago o en un recipiente. Resulta de esto que es muy fácil obtener la cantidad que sea de jugo gástrico, preferiblemente de animales vivos. Así se podría proveer a los enfermos y demás aquejados de dispepsia de un medio para digerir.»

RETALLAR EL KOH-I-NOOR. «Se comprobó que este célebre diamante, que tan gran sensación causó en la Gran Exposición del Palacio de Cristal, estaba muy incorrectamente tallado y no llegaba a exhibir ni la mitad de su belleza. Se mantuvieron consultas con la Reina, el Príncipe Alberto y algunos eminentes científicos con el objeto de ver si se podría volver a tallarlo sin peligro y mejorarlo. Parece ser que toda la talla mundial de diamantes la hacen en Holanda hábiles lapidarios de larga experiencia; se mandó a buscar al más famoso de ellos, de confesión judía, y se le consultó acerca de la seguridad y confianza con que podría tallarse la famosa 'montaña de luz'. Por noticias recientes llegadas de Europa sabemos que el trabajo ya ha terminado. Nuestra piedra es ahora la mejor del mundo por su tamaño, aguas y belleza.»

TRABAJADORAS DE LA CONFECCIÓN. «En el Ulster y por el oeste, la industria del bordado emplea a un cuarto de millón de mujeres. Casi sin excepción, trabajan en el hogar, a la vista de padres y amigos. De ese modo pueden ganarse el sustento sin poner en peligro su moralidad.»

APUNTES

BIOINGENIERIA
Polio de laboratorio

Se ha logrado sintetizar el virus de la polio con poco más que la ristra de letras —está a disposición pública— que representa su genoma y un tubo de ensayo. Los investigadores, de la Universidad de Nueva York en Stony Brook, encargaron hebras de ADN víricas a una empresa biotecnológica y confeccionaron con ellas los 7500 pares de bases de ese organismo. Mezclaron a continuación el material genético con las enzimas y el material biológico necesario para que se desarrolle el virus. Las partículas resultantes infectaban y mataban células humanas, atraían anticuerpos específicos del poliovirus e indujeron la enfermedad en ratones. El virus sintético, eso sí, fue mil veces menos eficaz a la hora de paralizar o matar a los ratones, quizás a causa de los marcadores genéticos que lleva, según explica el grupo en su artículo de la edición informática de *Nature*. Con esta técnica, seguramente, no se podrá contar por ahora para construir virus muchos más complejos, como el de la viruela. Habrá que retener las reservas de vacuna de la polio más de lo que se pensaba.

—JR Minkel



GELDERBLOM/EYE OF SCIENCE/ PHOTO RESEARCHERS, INC.

El virus de la polio se puede ya sintetizar en el laboratorio

MECANICA CUANTICA
Más sobre las desigualdades de Bell

Con ingenuidad, podría creerse que las teorías científicas se consolidan empezando por sus fundamentos, que sólo han de fraguar todavía los pisos recién añadidos. No es así con la mecánica cuántica. Parece que siempre vuelve a haber posibilidades de discordia hasta en terrenos muy trillados. Y las dificultades no se presentan donde el aparato matemático resulta más formidable, sino donde es tan ligero —aunque no trivial— que se acerca peligrosamente a la informalidad de la interpretación, más propensa al olvido o a la tergiversación. Bell demostró hace cerca de cuarenta años que no eran concluyentes las pruebas de Von Neumann y Gleason de que las predicciones estadísticas mensurables de la mecánica cuántica no se podían reproducir con una teoría más clásica; imponían condiciones de las que cabía prescindir. En 2001, Karl Hess y Walter Philipp criticaban a su vez la propia prueba de Bell de esa misma imposibilidad, que se resume en las famosas desigualdades de Bell. Sin embargo, en los últimos meses, conocidos expertos en la fundamentación de la mecánica cuántica, entre ellos Myrvold, Gill, Zeilinger y Mermin, han ofrecido refutaciones de este nuevo argumento; mantienen que el modelo que Hess y Philipp presentan a modo de contraejemplo del teorema de Bell viola una de las premisas que éste impone a los modelos clásicos, la de "localidad", o inexistencia de ligazones entre los procesos físicos cuando están separados lo suficiente para que la relatividad prohíba su conexión causal. Pero, de momento, la historia no ha acabado: Hess y Philipp se reafirman. Su punto de partida es que Bell, al no tener en cuenta el papel del tiempo en las mediciones, pasó por alto que hasta en un contexto clásico puede haber ciertas correlaciones sin nexo causal.

CLIMA
Estelas amortiguadoras

La prohibición del tráfico aéreo tras los ataques del 11 de septiembre ofreció una oportunidad inesperada de medir los efectos climáticos de los aviones. Las estelas de condensación, generadas al convertirse en hielo el vapor de agua contenido en los gases de escape de los reactores, se forman a altitudes y con humedades que las nubes corrientes no soportarían. Enfrían la alta atmósfera al reflejar la luz solar y calientan la baja al retener el calor que se emitía hacia el exterior. Se cree que el efecto neto es un aumento de temperaturas, que vendría a ser un 2 por ciento del calentamiento global debido a los gases de invernadero.



NASA

Estelas de condensación en una imagen en falso color. Las zonas rosa oscuro están cubiertas de nieve

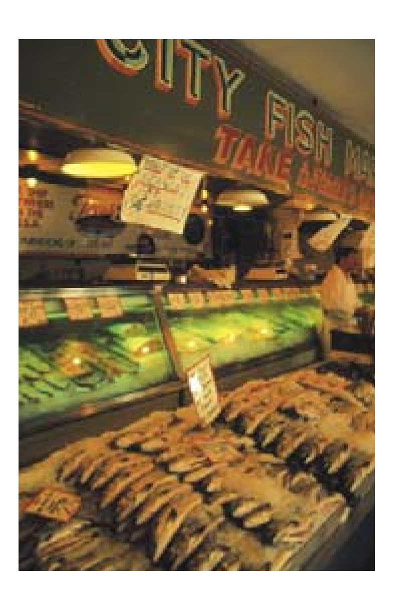
Gracias a los tres días sin vuelos comerciales se sabe algo más sobre los efectos de las estelas. David J. Travis ha publicado en *Nature* un estudio de los datos tomados por 4000 estaciones meteorológicas entre el 11 y el 14 de noviembre de 2001. Vio que la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima diarias aumentó en un grado; parece que las estelas amortiguan la variación de la temperatura a lo largo de las veinticuatro horas. Se espera que el tráfico aéreo crezca entre un 2 y un 5 por ciento durante los próximos 50 años; si es así, las estelas tendrán efectos climáticos importantes para 2050.

—Zeeya Merali

BIOLOGIA MARINA

Pez gordo, pez chico

Las normas que imponen un tamaño mínimo al pescado que se extrae del mar quizás estén causando cambios genéticos que disminuyen el peso de los peces y de las capturas; la lenta recuperación de los bancos donde se ha vedado la pesca sería un indicio de que esas normas consiguen lo contrario de lo que pretenden. David O. Conover y Stephan B. Munch, de la Universidad Estatal de Nueva York en Stony Brook, creen que han reforzado esta hipótesis con un experimento; lo explican en *Science*. Introducían pejerreyes del Atlántico en unos tanques. En cada uno los pescaban conforme a distintos criterios de selección. Inducían después la reproducción de los que no habían sido pescados, recogían sus larvas y repetían el proceso. Si extraían los peces mayores, el tamaño medio de la cuarta generación era menor que el inicial. Cuando, en cambio, los tomaban más chicos, los reproductores descendientes casi duplicaban el peso de los peces de control, seleccionados al azar, y cuadriplicaban el de los ejemplares de los tanques donde se habían estado extrayendo los pescados mayores; entre los animales extraídos, y las correspondientes capturas totales, las diferencias eran menores, pero del mismo sentido. Los autores llegan a recomendar que, aparte de establecer vedas, no se dicte un tamaño mínimo de los peces capturados, sino uno máximo.



WOLFGANG KAEHLER *Corbis*

CIENCIA FORENSE

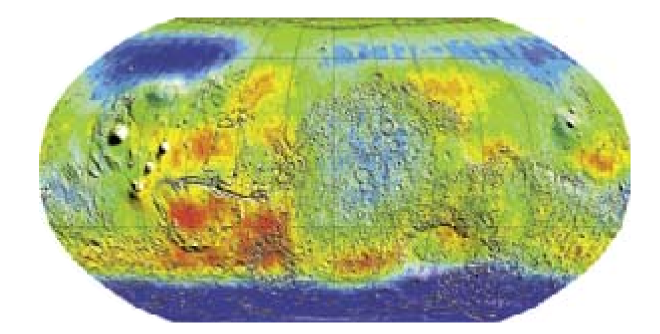
Expertos o científicos

En sus lecciones de 1974-75 en el Colegio de Francia, Michel Foucault se limitó a leer el informe de un prestigioso psiquiatra forense acerca de un imputado. Le sobraban los comentarios para demostrar lo que quería; a saber: que el escrito no era más que un compendio de prejuicios carente de valor científico o intelectual. Tampoco las prácticas de la llamada policía científica, aunque más prosaicas, pisan siempre suelo firme. Un juez estadounidense rechazó como prueba unas huellas dactilares porque nunca se han investigado las técnicas pertinentes conforme a las pautas habituales en las ciencias. Se atenía al caso Daubert, en el que el Tribunal Supremo dictaminó que los jueces debían velar por la fiabilidad de toda prueba científica. Luego se desdijo: la identificación de huellas era una “especialización” en la que no había que ser tan riguroso. El jurista David. L. Faigman ha criticado en *Science* esta distinción. Desde la promulgación de la sentencia del caso Daulbert, peritos de toda laya han renunciado, ante los tribunales, a que se los tome por científicos y han pedido que se los considere “expertos especializados o técnicos”. Así han de avalar sus opiniones sólo con “una combinación de años de experiencia personal y de aceptación general entre los miembros de un gremio bienintencionado”. “Los tribunales”, concluye Faigman, “pueden decretar que la identificación de huellas digitales es fiable, pero no por ello será más cierto.” Y lo mismo vale para el resto de la ciencia forense y para cualquier testimonio “experto”. “Está claro que no se puede admitir”, comenta en una carta posterior, “que existe una aceptación general de los detectores de mentiras sólo porque lo digan quienes los manejan, como tampoco admitimos que la aceptación de la astrología es general porque así sea entre los astrólogos.”

PLANETOLOGIA

Aguas de Marte

El análisis de los datos tomados por la sonda espacial Odissey ha descubierto una gran cantidad de agua helada en los niveles más externos de la superficie de Marte, tal y como explica un trío de artículos publicado en *Science*. Los rayos cósmicos desprenden neutrones de los núcleos de la superficie marciana donde inciden. Esas partículas se frenan (moderan) al chocar con los núcleos vecinos; habrá entonces otros núcleos que los absorban —tras lo que emitirán rayos gamma— mientras una parte de los neutrones escapa hacia el espacio. El hidrógeno es un buen moderador de los neutrones; por eso las emisiones de rayos gamma y de neutrones guardan correlaciones y anticorrelaciones con la presencia de hidrógeno en el suelo. A partir de unos 45 grados de latitud norte y sur se percibe hidrógeno en abundancia. Aunque no se detecta el agua de manera directa, los resultados son compatibles con que, en primera aproximación, el suelo conste de dos capas: una superficial, de varias decenas de centímetros de espesor, que poseería de un 1 a un 2 % de hidrógeno y adelgazaría a medida que se acercan los polos, y una subterránea, constituida por un material muy poroso, con una proporción en peso de agua congelada de entre el 20 y el 50 por ciento. Estas mediciones sólo aportan datos del primer metro de profundidad, pero es probable que la acumulación de hielo se extienda cientos de metros por debajo de la superficie.



El hielo enterrado de Marte (azul oscuro) *abunda sobre todo cerca de los polos (una capa estacional de CO_2 veló las latitudes más boreales)*

NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/ LABORATORIO NACIONAL DE LOS ALAMOS

Restricción calórica mimetizada

Desde hace años la ciencia farmacéutica se afana en la búsqueda de una sustancia capaz de prolongar la esperanza de vida y retrasar los achaques de la ancianidad. La investigación en la mímesis de la restricción calórica avanza en el camino correcto

Mark A. Lane, Donald K. Ingram y George S. Roth

Con rigor científico, no existe en el mercado ningún tratamiento eficaz contra el envejecimiento. Carecemos todavía de un remedio capaz de frenar el proceso de degradación molecular y celular que nos hace, con los años, más vulnerables a las enfermedades. Establecido esto, hemos de añadir que el consumo de una dieta baja en calorías, aunque equilibrada desde el punto de vista nutritivo, aumenta la longevidad y prolonga el estado de buena salud en muy diversas especies animales. Quizá también la restricción calórica podría frenar el envejecimiento en el hombre.

Mas para obtener el máximo beneficio las personas habrían de recortar su ingesta calórica un 30 %, bajar de 2500 calorías al día a unas 1750. Pocos mortales podrían ajustarse a un régimen tan exigente, sobre todo durante años. Pero, ¿qué sucedería si alguien idease una píldora que imitara los efectos fisiológicos de comer menos sin tener que pasar hambre? ¿Conseguiría esa mímesis de restricción calórica mantener a la gente en un estado saludable durante más tiempo, retrasando asimismo la aparición de diabetes, aterosclerosis, infartos, cáncer y otras afecciones relacionadas con la vejez?

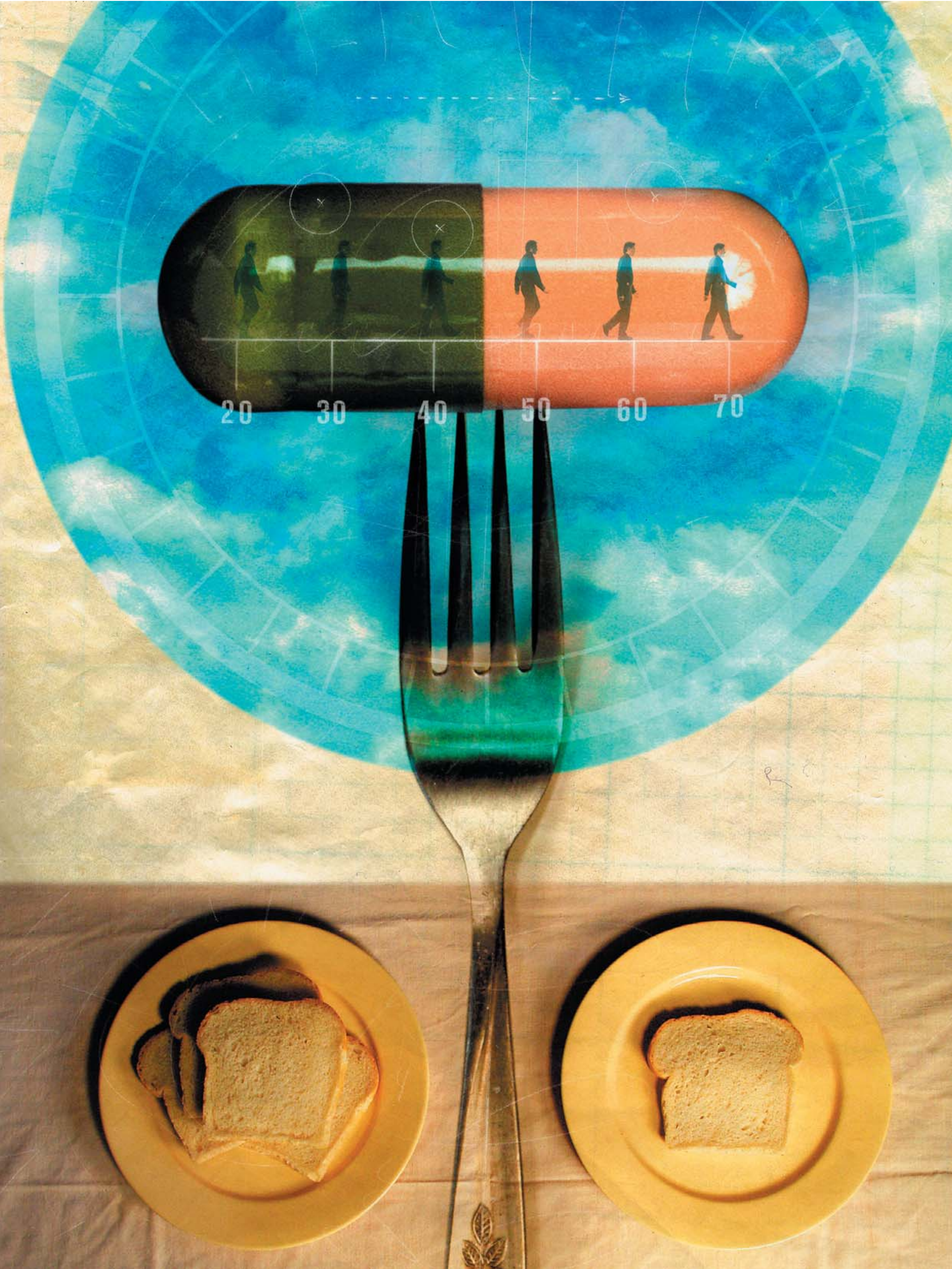
Propusimos esta cuestión a mediados de los años noventa, tras dar con un agente químico que en los roedores parecía reproducir muchos de los beneficios de la restricción calórica. Desde entonces, nos hemos afanado en la búsqueda de un compuesto que pudiera conseguir de forma segura idéntico efecto en las personas. Con ese fin se trabaja en otros laboratorios distintos del nuestro. De momento no se ha encontrado la sustancia ideal, pero en el camino hemos recogido valiosa información que consolida la esperanza de que la mímesis de la restricción calórica o, como se ha dado en llamar, restricción calórica mimetizada (RCM), se convierta en realidad.

Beneficios de la restricción calórica

Nuestra búsqueda de la RCM surgió del deseo de conocer mejor los efectos de la restricción calórica en el organismo. Se reconoció el valor de esa práctica hace ya más de 60 años, al comprobarse que las ratas sometidas a una dieta baja en calorías vivían más que el promedio de las que se alimentaban libremente; también en ellas bajaba la incidencia de afecciones habituales de la edad avanzada. Y lo que revestía mayor interés: algunos de los animales trata-

LA MIMESIS DE LA RESTRICCION CALORICA, si se consigue, permitiría al hombre disfrutar de buena salud en la vejez y de muchos de los beneficios duraderos que se observan en los animales sometidos a dietas restringidas, pero sin pasar hambre.

STUART BRADFORD


20 30 40 50 60 70

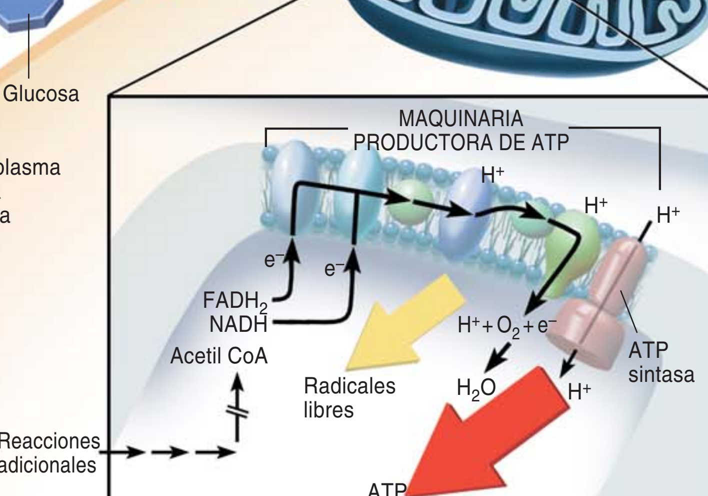
ASI FUNCIONA UN PROTOTIPO DE MIMESIS DE RESTRICCION CALORICA

De los candidatos para remedar la restricción calórica se ha estudiado con especial profundidad la 2DG (2-D-desoxiglucosa). Esta molécula se entromete en la vía que las células utilizan para procesar la glucosa. Se ha demostrado que la 2DG es tóxica a algunas de las dosis que se han usado en los animales, por lo que no puede emplearse en el hombre. Sin embargo, gracias a ella, se ha comprobado que una sustancia química puede reproducir los efectos de la restricción calórica; el reto se halla en descubrir algún compuesto que sirva de verdad.

Las células aprovechan la glucosa del alimento para formar ATP (adenosintrifosfato), la molécula que aporta la energía necesaria en muchas funciones del organismo (*secuencia superior*). En concreto, después de que la glucosa penetra en las células (*flechas azules*), se desarrollan en el citoplasma y mitocondrias una serie de reacciones enzimáticas que degradan la glucosa paso a paso hasta rendir sustancias que suministran electrones (e^-) a la maquinaria productora de ATP. La transferencia de electrones de un componente de la maquinaría al siguiente, y finalmente al oxígeno, hace que fluyan protones (H^+) a través de la ATPsintasa, un complejo que responde generando ATP (*flecha roja*).

Con la limitación de la ingesta, la restricción calórica (*secuencia intermedia*) minimiza la cantidad de glucosa que entra en las células y cae el tiro de síntesis de ATP. Cuando se administra 2DG a animales que se alimentan normalmente (*secuencia inferior*) penetra abundante glucosa en las células, pero el compuesto evita que la mayor parte de ella se procese, con lo que se reduce la síntesis de ATP.

Se han ofrecido diversas explicaciones sobre la razón por la que la interrupción del procesamiento de la glucosa retrasaría el envejecimiento. Para unos, el envejecimiento dependería de la emisión de radicales libres por parte de la maquinaria productora de ATP (*flechas amarillas*). Al agredir a las células, contribuirían no sólo al envejecimiento sino también a la aparición de enfermedades asociadas a la edad; el cáncer, por ejemplo. Con una menor actividad de la maquinaria, se limitaría la producción de los radicales y, por tanto, se mitigaría el daño celular. Según otros autores, el freno impuesto al procesamiento de la glucosa constituiría, para las células, una señal indicadora de escasez de alimento (aun cuando no fuera así) y les induciría a cambiar a un modo antienvejecimiento que prima la conservación sobre el crecimiento y la reproducción.



CONDICION NORMAL



RESTRICCION CALORICA

Glucosa

Entra menos glucosa, por lo que se procesa menos

Reacciones adicionales

H+

H+

e−

e−

FADH2

NADH

Acetil CoA

Radicales libres

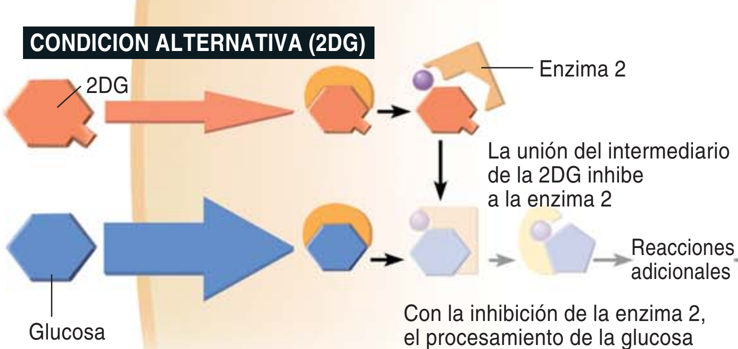
H+ + O2 + e−

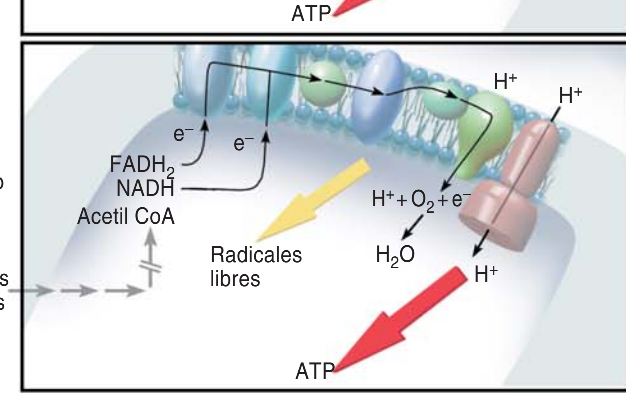
H2O

H+

ATP

CONDICION ALTERNATIVA (2DG)





TERESE WINSLOW

dos sobrevivieron a los animales más viejos del grupo control, es decir, aumentó el período máximo de vida (la máxima edad alcanzable), no simplemente la vida media. Con fármacos que combaten infecciones crece la esperanza media de vida de una población, pero sólo a través de medios que frenen el ritmo de envejecimiento del organismo se prolongará el máximo de la vida media.

Los hallazgos en la rata, replicados una y otra vez, se han corroborado en otros organismos, desde las levaduras hasta los hámsters, pasando por la mosca del vinagre, gusanos, peces, arañas y ratones. Hasta ayer mismo, los ensayos se circunscribían a especies de vida corta, muy distantes genéticamente del hombre. Pero los proyectos a largo plazo que se han iniciado con el rhesus y el mono tropical americano (*Saimiri sciureus*) sugieren que los primates responden a la restricción calórica de un modo casi idéntico a lo observado en roedores. En resumen, la RCM podría ayudar también al hombre.

Los proyectos en simios comenzaron, a finales de los ochenta, en el Instituto Nacional de Envejecimiento, y a principios del decenio siguiente en la Universidad de Wisconsin en Madison. De acuerdo con los resultados obtenidos, si se comparan con animales control que comen normalmente, los monos sometidos a restricción calórica manifiestan temperatura más baja y niveles de insulina inferiores, amén de conservar niveles propios de una edad juvenil de otras hormonas que tienden a descender con la edad, por

Si la 2DG puede imitar la restricción calórica en los animales, tal vez pueda hacer lo mismo en el hombre.

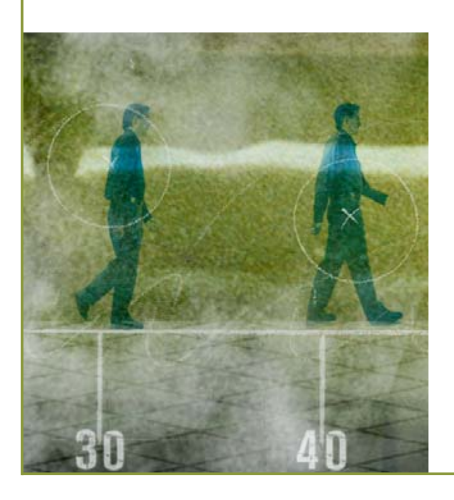
ejemplo, en el caso de la DHEA (sulfato de deshidroepiandrosterona).

Los animales se comportan también mejor en lo que se refiere a indicadores de riesgo sobre enfermedades asociadas a la edad. Presentan una presión arterial más baja; inferiores, los niveles de triglicéridos (con la prevención consiguiente de cardiopatías), y niveles de glucosa dentro de la normalidad (por tanto, un riesgo menor de diabetes, que se expresa por unos niveles de glucosa en sangre altos).

Hemos demostrado que el mono rhesus mantenido en restricción calórica un período prolongado (unos 15 años) sufre menos enfermedades crónicas, de acuerdo con lo previsto por los datos de riesgo. Los simios de experimentación habrán de seguir períodos de observación más prolongados para poder saber si la ingesta limitada de alimentos aumenta en ellos la vida media y la edad máxima: el mono rhesus vive unos 24 años, pudiendo alcanzar en ocasiones excepcionales los 40; el mono tropical americano vive unos 19 años, aunque alguno cumple incluso 28.

El comienzo de nuestra exploración

Hacia 1995 nos propusimos averiguar de qué modo los numerosos cambios fisiológicos y bioquímicos inducidos por la restricción calórica retrasaban el envejecimiento de los mamíferos. Razones de diverso tipo nos inducían a sospechar que la clave se escondía en los cambios experimentados por el metabolismo celular. Entendemos por "metabolismo" la captación de nutrientes de la sangre y su conversión en energía utilizable para las funciones celulares. En el marco del metabolismo, las ventajas de la restricción calórica dependen de la reducción del conjunto total de productos energéticos que entran en el organismo para su procesamiento. Además, la restricción calórica afecta a los procesos de envejecimiento de diversos tejidos, lo que implica que altera los procesos biológicos desarrollados por todas las células. Pocos procesos son más fundamentales que el metabolismo.



¿Se explicarían por los cambios relacionados con el metabolismo de la glucosa los beneficios de la restricción calórica? El azúcar en cuestión, que se forma cuando el organismo digiere hidratos de carbono, constituye la fuente principal de energía; se trata, en efecto, del material por excelencia que emplean las células para producir ATP (adenosintrifosfato), la molécula que posibilita la mayoría de las actividades celulares.

Por otro lado, ¿hasta qué punto resultan determinantes las alteraciones de la secreción de la insulina y de su actividad? La secreción de esa hormona influye en la utilización de la glucosa en las células; se segrega insulina cuando los niveles de glucosa en la sangre aumentan después de la ingesta, por lo que viene a ser la llave que abre las "puertas" de la célula al azúcar.

¿Por qué centramos la atención en la glucosa y en la insulina? Por la sencilla razón de que una reducción en los niveles de éstas y el aumento de la sensibilidad celular a la insulina se numeran entre los indicadores más sólidos de la restricción calórica, lo mismo en roedores que en primates. Se manifiestan, además, al poco de iniciar la restricción.

Los autores

MARK A. LANE, DONALD K. INGRAM y GEORGE S. ROTH investigaron juntos, durante largo tiempo, la restricción calórica en el Centro de Gerontología del Instituto Nacional de la Salud. Aunque se ha pasado a la empresa privada, Lane sigue colaborando con Ingram y Roth en proyectos oficiales. Ingram dirige la sección de neurociencias del comportamiento en el Instituto Nacional de la Salud, organismo en el que trabaja Roth desde hace 30 años.

EFECTOS DIVERSOS DE LA RESTRICCION CALORICA

Si comparamos roedores y monos sujetos a restricción calórica con sus correspondientes controles que reciben alimentación abundante, se aprecian diferencias en los resultados que anotamos abajo (*a-c*). Aunque debe avanzarse en el conocimiento de la influencia de tales cambios compartidos sobre el envejecimiento, las semejanzas tan estrechas en la respuesta de roedores y monos refuerza la esperanza de que los efectos de la restricción calórica sobre la promoción de la salud y la defensa contra el envejecimiento (*d*) sean comunes a todos los mamíferos, incluido el hombre. Si tal hipótesis se confirma, la mímesis de la restricción calórica contribuirá a que las personas disfruten, durante mayor tiempo, de una buena salud. Con el compuesto 2DG se han reproducido en ratas los efectos marcados con asterisco (*abajo*).





EL MONO sometido a restricción calórica (*izquierda*) es más bajo y flaco que el que no ha estado sujeto a ella (*derecha*)

a EFECTOS INDICATIVOS DE UNA ALTERACION DEL METABOLISMO, CRECIMIENTO O DESARROLLO

- Temperatura corporal más baja*
- Maduración sexual más lenta
- Maduración ósea más lenta

b EFECTOS INDICATIVOS DE MEJOR SALUD

- Menor peso*
- Menos grasa abdominal

c EFECTOS INDICATIVOS DE UNA REDUCCION DEL RIESGO DE ENFERMEDADES ASOCIADAS CON LA EDAD (DIABETES Y CARDIOPATIAS)

- Mayor sensibilidad a la insulina
- Niveles más bajos de insulina en el ayuno*
- Niveles más bajos de glucosa en el ayuno*
- Niveles más bajos de colesterol y triglicéridos
- Niveles más bajos del factor 1 de crecimiento semejante a la insulina
- Niveles más altos de colesterol "bueno" (HDL)
- Descenso más lento de los niveles de la hormona DHEAS

d EFECTOS ENCONTRADOS EN LOS ROEDORES QUE SIGUEN SIENDO OBJETO DE INVESTIGACION EN LOS MONOS

- Aparición retrasada de enfermedades relacionadas con la edad (incluido el cáncer*)
- Muerte celular programada más intensa (puede contribuir a limitar el crecimiento del tumor*)
- Vida media más alta
- Valor superior de esperanza de tiempo máximo de vida (signo claro de envejecimiento lento)

STUART BRADFORD; INSTITUTO NACIONAL DEL ENVEJECIMIENTO (*fotografías*)

Tras nuestra decisión de poner a prueba la hipótesis de que la restricción calórica retarda el envejecimiento al alterar el metabolismo, aparecieron resultados de otros investigadores donde se demostraba que los procesos metabólicos que implican a la glucosa y a la insulina influían en la esperanza de vida. Se confirmaba nuestro sentimiento de que nos hallábamos en el buen camino. En efecto, ciertos ensayos lograron una prolongación notable de la esperanza de vida en nematodos, después de introducir mutaciones de genes semejantes a los implicados en respuestas moleculares a la insulina en los mamíferos. Más recientemente se observó que un recorte en la ingesta de glucosa o una alteración del procesamiento de la glucosa dilataban la esperanza de vida de la levadura. Y en la mosca del vinagre, determinados genes implicados en el metabolismo, así el INDY (del inglés "I'm not dead yet", "todavía no me he muerto"), intervenían en el control de la esperanza de vida media.

Momento iluminador

Por la época en que apareció el trabajo sobre los nematodos, empezamos a explorar la bibliografía en torno a la secreción de insulina y la sensibilidad a ella sin causar diabetes o la condición opuesta, una hipoglucemia. Esa búsqueda nos llevó a trabajos de los años cuarenta y cincuenta que mencionaban la 2-D-desoxiglucosa (2DG), un compuesto que se sometía a ensayo en los roedores para tratar el cáncer; se indicaba también que rebajaba los niveles de insulina en la sangre. En semejante rastreo bibliográfico nos hallábamos cuando tuvimos un momento de iluminación.

Al parecer, el compuesto reproducía muchas respuestas clásicas ante la restricción calórica; entre ellas, reducción del crecimiento de los tumores (una respuesta sólo ligeramente menos intensa que la prolongación de la esperanza de vida), descenso de la temperatura, niveles elevados de hormonas glucocorticoides y reducción del número de ciclos reproductivos. Si la 2DG podía realmente imitar muchos aspectos de la restricción calórica en los animales, ¿por qué no podría conseguir lo mismo con las personas?

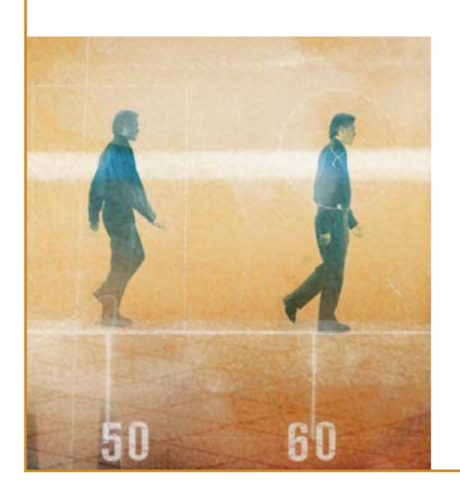
Cuando planeábamos nuestros primeros estudios con la 2DG, buscamos en la bibliografía información sobre su comportamiento molecular. Leímos que alteraba el funcionamiento de una enzima clave en el procesamiento celular de la glucosa. Desde el punto de vista de la estructura, el compuesto recuerda a la glucosa, por cuya razón penetra sin dificultad en las células. Sufre también la acción degradante de una enzima que suele actuar sobre la propia glucosa. Pero la enzima que completa el paso siguiente, de los varios implicados en el procesamiento de la glucosa, se atasca con el producto intermediario producido a partir de 2DG. Fracasa en su intento de actuar sobre dicho intermediario; además, se resiente su capacidad para actuar en el intermediario de la glucosa.

De todo ello resulta que las células fabrican cantidades menores de subproductos de la glucosa, tal como ocurre cuando la restricción calórica limita la cantidad de azúcar que entra en las células. Algunos de estos productos sirven de materia prima para la maquinaria que sintetiza el ATP, mecanismos que constan de complejos proteicos alojados en las mitocondrias, unos orgánulos intracelulares. Privada de esta materia prima, la maquinaria fabrica menos ATP. En esencia, la 2DG engaña a la célula para que entre en un estado metabólico semejante al que se observa durante la restricción calórica, aun cuando el organismo esté ingiriendo cantidades normales de alimento. Mientras la cantidad de ATP producido baste para los requerimientos mínimos de la célula, este menor rendimiento de los mecanismos sintetizadores de ATP resulta, tal parece, beneficioso.

¿Por qué podría un freno del funcionamiento de la maquinaria sintetizadora de ATP retrasar el envejecimiento? Aunque no lo sabemos con exactitud, tenemos algunas pistas. Para cierta teoría sobre el envejecimiento que perdura desde hace años, deberíase éste a los radicales libres, moléculas que, en buena medida, se producen durante el proceso de síntesis de ATP. A estas moléculas, muy reactivas, se les ha venido atribuyendo la agresión permanente de diversas partes de la célula, incluidos los complejos proteicos responsables de la formación de ATP. Si redujéramos la tasa de síntesis de ATP, entonces quizá la 2DG y la restricción calórica frenarían la cadencia con que se generan los radicales libres que degradan las células.

La merma de subproductos de la glucosa podría también retardar el envejecimiento por otra vía. Algunas de estas sustancias promueven que las células del páncreas segreguen insulina tras la ingesta. Una disminución cuantitativa de esos subproductos limitaría, quizá, la secreción de insulina y reduciría, por tanto, las acciones indeseables de la insulina en el organismo. Además de promover indirectamente un funcionamiento frenético de la maquinaria de síntesis de ATP y potenciar así la producción de radicales libres, la insulina puede facilitar las cardiopatías y una indeseable proliferación celular.

El problema ahora es encontrar otras sustancias que produzcan los beneficios de la 2DG pero que sean más inocuas.



Sospechábamos también que las células interpretan la merma de materia prima para la maquinaria productora de ATP como una señal indicadora de escasez del suministro de alimento. Las células podrían responder a ese mensaje entrando en un estado de autoprotección e inhibiendo actividades prescindibles para su mantenimiento y reparación (la reproducción, por ejemplo), amén de canalizar la mayor parte de la energía hacia la conservación de la integridad de sus partes. Si andábamos en lo cierto, este razonamiento podría explicar por qué la restricción calórica aumenta la producción de sustancias que protegen a las células de un exceso de calor y otros tipos de estrés.

La adopción de este procedimiento de autoconservación constituiría un reflejo de esos cambios que se han propuesto que ocurren en un organismo sujeto a una escasez alimentaria. En la teoría sobre el envejecimiento generalmente aceptada del "soma prescindible", Thomas Kirkwood, de la Universidad de Newcastle, postula que los organismos procuran un equilibrio entre la necesidad de procrear y la necesidad de mantener el cuerpo, o soma. Cuando abundan los recursos, el individuo puede mantenerse, crecer y reproducirse. Pero si se restringe la disponibilidad de los mismos, el cuerpo pone en funcionamiento procesos que inhiben el crecimiento y la reproducción, para tomar medidas que le permitan conservar el soma.

Comienzan las pruebas

En nuestros primeros experimentos encaminados a examinar la eficacia de la 2DG, administramos dosis bajas a ratas incorporándola en su ingesta, durante seis meses. El tratamiento redujo moderadamente los niveles de glucosa en ayuno (niveles medidos después de retirar el alimento durante 12 horas), peso corporal y temperatura; rebajó, asimismo y de forma notable, los niveles de insulina en el ayuno. Ambos resultados guardaban coherencia con las acciones de la misma restricción calórica. Importa destacar que, después de un ajuste inicial a la nueva dieta, el grupo que recibía la 2DG no comía significativamente menos que los controles. Así pues, estos análisis preliminares revelaron que era posible imitar al menos algunas consecuencias de la restricción calórica sin menguar la ingesta.

Publicamos los resultados en 1998. Al poco, otros grupos comenzaron a identificar nuevas vías por las que la 2DG imitaba la restricción calórica. El grupo de Mark Mattson, entonces en la Universidad de Kentucky, había señalado con anterioridad que la restricción calórica podría atenuar las agresiones contra las neuronas y limitar déficits de comportamiento en roedores tratados con compuestos tóxicos para las células cerebrales. Cuando aplicaron, en vez de restricción calórica, el compuesto 2DG a los roedores, observaron también la misma protección neuronal.

Desde hace algún tiempo estamos inmersos en ensayos a largo plazo con roedores para identificar los efectos de la 2DG. Los resultados ya obtenidos confirman nuestros hallazgos previos de que la mo-

lécula 2DG reduce ligeramente la glucosa en sangre y rebaja la temperatura corporal. Al propio tiempo, intentamos dilucidar si la 2DG reduce la incidencia de cáncer y aumenta la esperanza de vida cuando los animales se alimentan con dosis bajas desde el nacimiento hasta la muerte.

Hasta el momento, este trabajo nos proporciona una "prueba de concepto" de que, inhibiendo el metabolismo de la glucosa, se recrean muchos efectos de la restricción calórica. Sin embargo, la 2DG presenta un inconveniente fatal que evita que sea la "píldora mágica" que buscamos. Aunque es segura a determinados niveles bajos, se convierte, al parecer, en un producto tóxico para algunos animales cuando la cantidad administrada supera dicho umbral o se administra durante períodos prolongados. El intervalo mínimo de la zona de seguridad que separa una dosis útil de una dosis tóxica impediría su uso en el hombre. Esperamos que esto no sea un rasgo general de la RCM.

Camino adelante

Suponiendo que nuestros estudios a largo plazo confirmen que una inhibición del metabolismo pueda retardar el envejecimiento, el reto se cifrará en encontrar otras sustancias que produzcan los beneficios de la 2DG y sean, al propio tiempo, más inocuas en una gama amplia de dosis y pautas de administración. En el horizonte aparecen varios candidatos prometedores, a tenor de las investigaciones incoadas. Entre ellos, el yodoacetato, estudiado por el grupo de Mattson en el Laboratorio de Neurociencias. En los animales este agente parece proteger las células cerebrales frente a ataques por sustancias tóxicas, lo mismo que ocurre con la 2DG y la restricción calórica. La medicación antidiabética que potencia la sensibilidad de la insulina podría revestir, asimismo, interés, siempre que las cantidades administradas no produzcan descensos excesivos de glucosa en sangre.

Buena parte de la investigación se centra en el metabolismo de la glucosa y su implicación en la regulación de la esperanza de vida. Pero hay en el metabolismo otros aspectos que cambian ante una restricción calórica. Cuando el organismo no puede extraer energía suficiente de la glucosa procedente del alimento, busca por otras vías la energía que necesita. A través de la degradación de proteínas y grasas, por ejemplo. Los fármacos dirigidos hacia esos procesos podrían servir de RCM, solos o en combinación con medicinas que intervienen en el metabolismo de la glucosa. Se han identificado ya algunos compuestos que actúan en esas vías metabólicas, aunque no se ha evaluado todavía su potencial de mímesis de la restricción calórica. Los fármacos que replican sólo efectos seleccionados de la restricción calórica podrían desempeñar también algún papel. En teoría, las vitaminas antioxidantes encajarían a la perfección. La investigación realizada hasta este momento, sin embargo, indica que esta intervención particular, muy probablemente, no favorecerá la longevidad.

A diferencia de la multitud de elixires a los que se da el apelativo de remedios contra la vejez, la RCM alteraría procesos fundamentales que intervienen en el envejecimiento. Nos hemos propuesto desarrollar compuestos que muevan a las células a activar el mantenimiento y ejecutar funciones de reparación que darían lugar a una salud mejor y mayor longevidad del organismo. Esa tarea, aunque difícil, ha dejado de ser imposible.

Bibliografía complementaria

RESTRICCIÓN CALÓRICA Y ENVEJECIMIENTO. Richard Weindruch, en *Investigación y Ciencia*, págs. 12-19; marzo de 1996.

2-DEOXY-D-GLUCOSA FEEDING IN RATS MIMICS PHYSIOLOGICAL EFFECTS OF CALORIC RESTRICTION. Mark A. Lane, George S. Roth y Donald K. Ingram en *Journal of Anti-Aging Medicine*, vol. 1, n.º 4, págs. 327-337, invierno de 1998.

CALORIC RESTRICTION IN PRIMATES AND RELEVANCE TO HUMANS. George S. Roth, Donald K. Ingram y Mark A. Lane, en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 928, págs. 305-315; 2001.



El 95 por ciento del universo está perdido. ¿O puede que no?

Mordehai Milgrom

¿Existe realmente la



materia oscura?

El problema de la materia oscura nace de una incongruencia en la masa de las galaxias y las estructuras cósmicas de mayor escala. Los constituyentes de estos sistemas —las estrellas y el gas en el caso de las galaxias, el gas y las galaxias en el caso de los cúmulos de galaxias— se mueven en su seno pero no escapan: los sujeta la atracción gravitatoria del resto del sistema. Con las leyes de la física se calcula cuánta masa tiene que haber para contrarrestar los movimientos y prevenir la dispersión del sistema. Pero la masa total que se observa en el cielo es, con diferencia, menor que la calculada.

Se ve en todas partes esta discrepancia. Aparece en cualquier sistema, de las galaxias enanas, las galaxias normales y los grupos de galaxias a los inmensos supercúmulos. La masa calculada resulta, según los casos, entre unas pocas veces y cientos de veces mayor que la observada.

Hay necesidad de más materia no sólo en los sistemas galácticos bien formados, sino a lo largo del universo como un todo. Mucho antes de que nacieran las galaxias llenaba el universo un plasma de núcleos atómicos y partículas subatómicas. Se mantuvo bastante uniforme gracias a la radiación que lo impregnaba. Sus fluctuaciones de densidad no tuvieron una oportunidad de crecer y engendrar las galaxias hasta que no se convirtió en un gas neutro, que interacciona menos con la radiación. Sabemos cuándo tuvo lugar esta neutralización y cuál era la intensidad de las fluctuaciones de densidad por entonces. El problema es que no hubo tiempo suficiente para que esas fluctuaciones se convirtieran en las galaxias que hoy día observamos. La materia oscura ayudaría; neutra por definición, no la homogeneizaría la radiación; habría estado contrayéndose continuamente y tenido el tiempo de formar cuerpos de masa galáctica.

SLIM FILMS

La idea más extendida es que una parte de esta masa extra no es más que materia común que emite muy poca luz, menos de la que cabe detectar con las técnicas actuales: planetas, estrellas enanas y gas caliente. Es más apropiado hablar en este caso de materia apagada. Podría ser hasta diez veces más abundante que la materia observada por los astrónomos, pero aun así sólo aportaría un décimo de la masa perdida. Las menciones a la materia oscura se refieren con frecuencia a una clase exótica de materia que compense la diferencia. Para añadir más confusión, también se cree que existe una energía oscura, un tipo particular de energía que causa la expansión acelerada del universo, fenómeno que ni la materia oscura ni la común pueden explicar [véase "El universo y su quintaesencia", por Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2001].

En resumen, de ordinario se piensa que el contenido energético actual del universo se compone de alrededor de un cuatro por ciento de materia común (o "bariónica") —de la cual un diez por ciento se observa en forma de estrellas y gas—, de una tercera parte de materia en un estado desconocido y de dos terceras partes de energía oscura, de cuya naturaleza se sabe aún menos.

En la oscuridad

Si nos ceñimos a las leyes de la física que aceptamos, no hay otra explicación de las incongruencias de la masa que la existencia de una materia oscura. Pero si permitimos que se les haga alguna modificación, podremos deshacernos de la materia oscura.

Las diversas formas en que la discrepancia de masas se manifiesta en los movimientos internos de los sistemas galácticos provienen de una sola fórmula de la física newtoniana, que combina dos leyes básicas: la ley de gravitación de Newton (que relaciona la fuerza de la gravedad entre dos cuerpos con sus masas y la distancia que los separe) y la segunda ley de Newton (que relaciona la fuerza con la aceleración). La aceleración de un cuerpo en una órbita depende de la velocidad con que se mueva en su órbita y del tamaño de ésta. La conjunción de estas piezas conecta, pues, masa, velocidad y tamaño de la órbita.

Estas leyes explican con precisión la trayectoria de un misil balístico y el movimiento de los planetas. Pero no está probado que valgan para las galaxias. ¿Estarán equivocadas? Si fallasen, cambiarlas volvería innecesaria la materia oscura.

Hay precedentes de modificaciones así. La física newtoniana ha sufrido dos cambios necesarios. La primera actualización de la dinámica newtoniana fue la teoría de la relatividad —tanto la teoría especial (que modificó la segunda ley de Newton) como la general (que alteró la ley de gravitación)—. La segunda acabó por dar lugar a la teoría cuántica, que explica el comportamiento de los sistemas microscópicos, y en ciertas circunstancias incluso de los macroscópicos. Estas dos extensiones de la dinámica newtoniana se aplican en condiciones extremas: velocidades muy altas (relatividad especial) o gravedades muy intensas (relatividad general). El grueso de los fenómenos de la dinámica galáctica no corresponde a estas particulares condiciones.

¿Qué características de los sistemas galácticos son tan extremas que puedan exigir una nueva modificación de la física? De entrada, es el tamaño. Es posible que la gravedad se aleje de la ley newtoniana a grandes distancias. Ya en 1923, James H. Jeans propuso cambiar a escalas galácticas la manera en que la gravedad depende de la distancia. Pero las observaciones discordantes que el astrónomo intentaba explicar no guardaban relación con la materia oscura y, en cualquier caso, se refutaron más tarde.

Arrigo Finzi, por entonces en la Universidad de Roma, avanzó en 1963 también una modificación de la dependencia de la distancia; pretendía con ello resolver el problema de la materia oscura en los cúmulos. A principios del decenio de 1980 demostré, sin embargo, que ese cambio de la ley de gravitación no reproducía las observaciones.

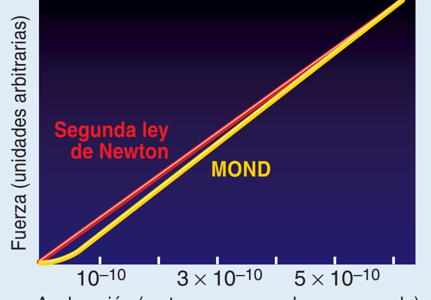
¿Qué valdrá entonces? Tras considerar varias posibilidades, terminé quedándome con la aceleración. En

El autor

MORDEHAI MILGROM es profesor de física teórica en el Instituto Weizmann de Rehovot, Israel. Es el padre de la teoría MOND, la más exitosa y persistente de las alternativas a la materia oscura.

Resumen/*Una alternativa a la materia oscura*

- Los astrónomos tienen dos formas de determinar cuánta materia hay en el universo. Suman todo lo que ven. O miden la velocidad a la que se mueven los cuerpos, aplican las leyes de la física y obtienen cuánta masa se necesita para generar una gravedad capaz de retenerlos. Los dos métodos dan resultados distintos. La mayoría concluye que en el universo existe alguna clase de materia invisible: la famosa materia oscura.
- Pero quizás el fallo resida no en la materia, sino en las leyes de la física. El autor ha propuesto una modificación de las leyes de Newton sobre movimiento (*véase la figura*) —o, lo que es lo mismo, de la ley gravitatoria— que podría resolver la discrepancia.
- La modificación, conocida como teoría MOND, reproduce bien las observaciones, mejor en muchos aspectos que la materia oscura. Hay que decir que la teoría MOND presenta algunos problemas, que podrían resultar irrelevantes o arruinarla.



La nueva teoría, MOND, modifica la segunda ley de Newton del movimiento para aceleraciones muy pequeñas.

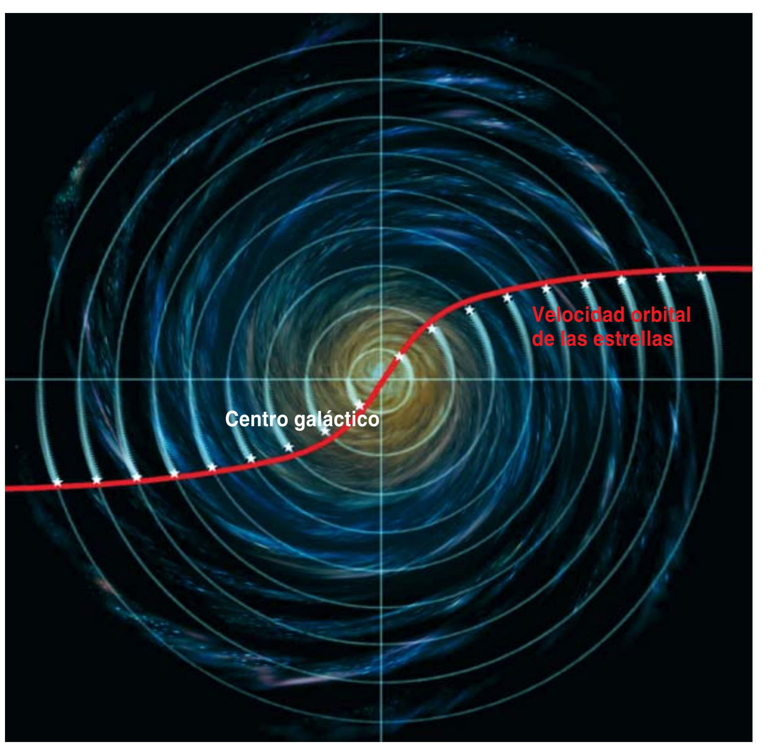
BRYAN CHRISTIE DESIGN

ROTACIONES

Al igual que los planetas del sistema solar giran alrededor del Sol, las estrellas de una galaxia describen órbitas en torno al centro galáctico; el Sol completa una vuelta a la Vía Láctea cada 200 millones de años, más o menos. Las estrellas de los discos de las galaxias espirales tienen órbitas casi circulares; las recorren a una velocidad que depende de su distancia al centro.

Hay dos factores que determinan la velocidad: la distribución de masa y el debilitamiento de la fuerza de la gravedad con la distancia. El primer efecto es simplemente geométrico —la cantidad de masa dentro de una órbita estelar aumenta con la distancia—. Es el efecto que domina en las regiones interiores de la galaxia. Más lejos, importa más el segundo factor. Como resultado neto, la velocidad orbital al principio aumenta, para luego alcanzar un máximo y disminuir a continuación. Esta relación entre la velocidad y la distancia se denomina curva de rotación.

Según las leyes de Newton, la curva de rotación debería seguir disminuyendo siempre. Si la teoría MOND es correcta, habría de llegar a un valor constante.



los sistemas galácticos las aceleraciones son muchos órdenes de magnitud inferiores a las de nuestra experiencia cotidiana. La aceleración del sistema solar hacia el centro de nuestra galaxia (un angstrom, o 10^{-10} metros, por segundo por segundo) constituye una parte en mil millones de la aceleración que una lanzadera espacial sufre hacia el centro de la Tierra (unos 10 metros por segundo por segundo). Hace ya casi 20 años propuse una modificación de la segunda ley de Newton que cambiaba la relación entre la fuerza y la aceleración cuando ésta es pequeña. Así nacía una idea nueva: MOND, acrónimo en inglés de "dinámica newtoniana modificada".

Tomar velocidad

La teoría MOND introduce una nueva constante de la naturaleza, a_0, con dimensiones de aceleración. Cuando la aceleración supera con creces a a_0, la segunda ley de Newton se aplica como siempre: la fuerza es directamente proporcional a la aceleración. Pero cuando es pequeña comparada con a_0, se modifica la ley: la fuerza es proporcional a la aceleración al cuadrado. En este esquema, para impartir una aceleración se exige menos fuerza que en la dinámica de Newton; en consecuencia, para explicar las aceleraciones observadas en las galaxias, MOND predice fuerzas menores —por tanto, menores masas gravitatorias— que la dinámica newtoniana (*véase el recuadro* "Una alternativa a la materia oscura"). Con ello elimina la necesidad de una materia oscura.

En las lindes de las galaxias la aceleración gravitatoria disminuirá con la distancia hasta hacerse menor que a_0. La distancia donde ocurra dependerá de la masa y de a_0. Cuanto mayor sea la masa, más lejos empezarán los efectos MOND. Para el valor de a_0 dictado por los datos y para una galaxia de masa ordinaria, la transición tiene lugar a una distancia de varias decenas de miles de años-luz del centro galáctico. Dada la masa típica de un cúmulo de galaxias, sucede a unos cuantos millones de años-luz del centro.

Supongamos que la mayor parte de una galaxia se contiene dentro de un determinado radio. Según las leyes dinámicas newtonianas, la velocidad de los objetos (estrellas o gas) que describan órbitas circulares más allá de este radio debería disminuir con la distancia. Así ocurre en el sistema solar. La mayor parte de la masa del sistema solar se halla en el Sol y la velocidad orbital de los planetas se reduce con la distancia. Mercurio gira alrededor del Sol mucho más deprisa que la Tierra, por ejemplo. Allí donde se aplicase la teoría MOND, la situación sería completamente distinta. A distancia suficiente del centro de la galaxia, la velocidad orbital dejaría de disminuir y alcanzaría un valor constante, proporcional a la raíz cuarta de la masa de la galaxia.

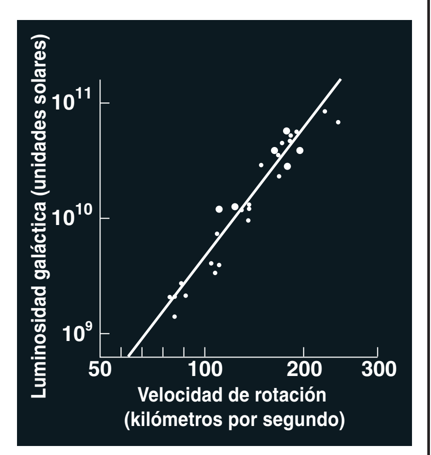
¿Sale bien parada la teoría MOND al compararla con las observaciones? Las velocidades orbitales de las galaxias espirales, en lugar de irse reduciendo a medida que crece la distancia al centro galáctico, acaban por adoptar un valor constante, tal y como predice la teoría MOND. Es más, según la correlación de Tully-Fisher, que se desprende de las observaciones, esa velocidad cons-

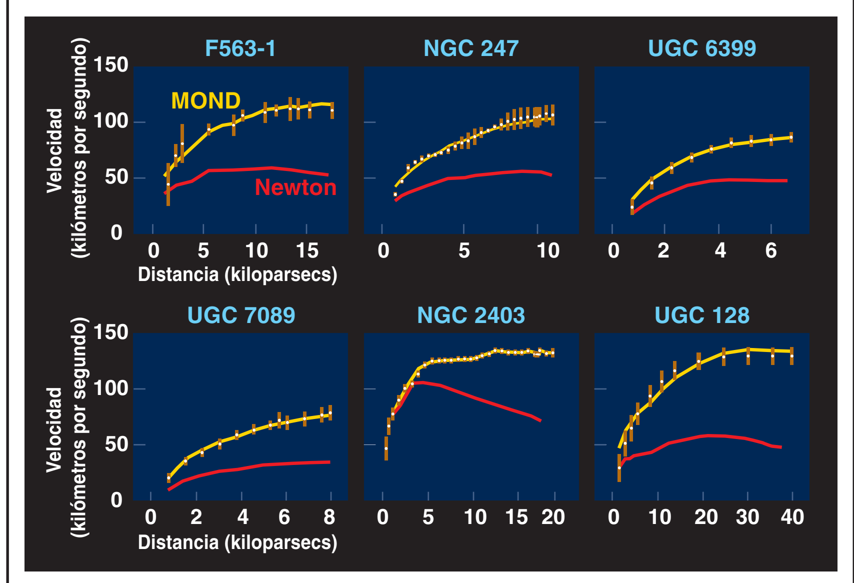
DON DIXON

LA TEORIA FRENTE A LOS DATOS

La teoría MOND reproduce ciertas observaciones de galaxias con una notable precisión. A la derecha tenemos la relación de Tully-Fisher. En una muestra de galaxias espirales, la velocidad orbital de las estrellas en las lindes de las galaxias se correlaciona con el brillo galáctico. Los datos se ajustan a una línea recta; la predicción de la teoría MOND encaja dentro de la precisión de las medidas.

Abajo se presentan las curvas de rotación de varias galaxias, que muestran la variación de velocidad orbital con la distancia al centro galáctico.





tante es proporcional a la raíz cuarta de la luminosidad de la galaxia. Se trata también de una consecuencia natural de la teoría MOND. La clave estriba en presuponer la proporcionalidad, exacta o casi exacta, de la luminosidad y la masa. Las observaciones más recientes confirman esta premisa: la correlación entre la velocidad y la masa es incluso más fuerte que la correlación entre la velocidad y la luminosidad.

Ya se intuían estas regularidades cuando propuse la teoría MOND; me guiaron en su desarrollo. El especial interés de MOND le viene de que prediga muchos otros efectos que no podían ni contrastarse cuando la formulé. Nos ofrece un ejemplo la naturaleza de las galaxias de bajo brillo superficial, aglomeraciones estelares tan tenues que apenas se las puede detectar. En las galaxias comunes, la aceleración supera el valor de a_0 hacia el centro galáctico y cae por debajo de él en los bordes; en las de bajo brillo superficial siempre es menor que a_0. De acuerdo con la teoría MOND debería observarse la incongruencia de la masa a lo largo de toda una galaxia de este tipo. Cuando planteé la teoría apenas se conocían unas pocas galaxias de bajo brillo superficial y ninguna había sido analizada en detalle. Desde entonces, se ha encontrado que la diferencia entre la masa total observada y la predicha es mayor y más desproporcionada en ellas que en las galaxias normales [*véase* "Galaxias fantasma", por Gregory D. Bothun; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1997]. La teoría MOND ya anticipó correctamente este resultado. Incluso predijo la magnitud de la discrepancia.

Otro éxito de la teoría está relacionado con la forma de las curvas de rotación galáctica —esto es, la variación precisa de la velocidad orbital con la distancia—. Sólo a partir de finales de los años ochenta hubo observaciones con el detalle suficiente para compararlas con las predicciones teóricas. Y el parecido con la teoría MOND es notable (*véase el recuadro* "La teoría frente a los datos"). Estas comparaciones, no obstante, involucran un parámetro que ha de ajustarse para cada galaxia: el factor de conversión entre la luz estelar y la masa. El valor que se infiere para este parámetro coincide con las expectativas teóricas. En el caso de la materia oscura, en cambio, las comparaciones incluyen al menos dos parámetros ajustables más por galaxia: la extensión y la masa de la materia oscura. A pesar de esa flexibilidad, las actuales teorías de la materia oscura no pueden explicar los datos de la velocidad de rotación con la precisión que aporta la teoría MOND.

¿La excepción que confirma la regla?

En otros sistemas galácticos, cuando se representa la discrepancia de la masa en función de la aceleración típica, la observación coincide casi por completo con lo predicho por la teoría MOND (*véase el recuadro* "La teoría MOND en los sistemas galácticos"). La única excepción son los cúmulos ricos en galaxias. Si consideramos los cúmulos como un todo, ofrecen una discrepancia de masa de un factor entre cinco y diez; MOND puede explicarlo. Si, por el contrario, nos concentramos en las regiones más interiores de los cúmulos, observaremos que aún existe una discrepancia. La teoría MOND no puede eliminar por completo la masa invisible. Es posible que falle la teoría, pero cabe también que las observaciones sean incompletas. Quizá grandes cantidades de materia apagada —materia común en forma de estrellas débiles o gas templado— permanezcan escondidas dentro de estos sistemas.

Lo ideal sería que la teoría MOND se comprobase con experimentos fí-

DON DIXON (*gráfica superior*); FUENTE: ROBERT H. SANDERS *Instituto Astronómico Kapteyn* Y MARC A. W. VERHEIJEN *Universidad de Wisconsin, Madison*; BRYAN CHRISTIE DESIGN (*gráficas inferiores*); FUENTE: STACY S. MCGAUGH *Universidad de Maryland*

sicos, no sólo con observaciones astronómicas. Por desgracia, no cabe realizar pruebas de laboratorio. La aceleración que ha de satisfacer el criterio MOND es la aceleración total con respecto a un sistema de referencia absoluto. En la Tierra, o la parte del sistema solar cercana a ella, la elevada aceleración de fondo debida a la gravedad terrestre, la rotación del planeta, su giro alrededor del Sol y muchos otros factores falsearía los efectos MOND aun cuando pudiésemos montar un sistema experimental con aceleraciones internas muy pequeñas. De igual forma, sería muy difícil demostrar la teoría MOND estudiando el movimiento de los planetas. La aceleración de los cuerpos en órbita alrededor del Sol no quedará por debajo de a_0 mientras no se hallen más de diez mil veces más lejos del Sol que la Tierra, allende la órbita de Plutón. Desconocemos la estructura de MOND para grandes aceleraciones —régimen donde esta teoría se separaría muy poco de la dinámica newtoniana—. Pudiera ser que la posible discrepancia, a pesar de su pequeñez, produzca efectos observables. Las anomalías que se dice haber observado en el movimiento de un determinado satélite artificial, si se confirmasen, encontrarían una explicación natural en el contexto de MOND.

Así como la constante de Planck desempeña muchos papeles en la teoría cuántica, la constante a_0 se presenta de numerosas maneras en las predicciones de MOND sobre los sistemas galácticos. Es parte del éxito de la teoría el hecho de que el mismo valor —aproximadamente un angstrom por segundo por segundo— dé buenos resultados en cada uno de esos avatares.

A pesar de sus éxitos, la teoría MOND constituye, por el momento, una teoría fenomenológica limitada. Por fenomenológica entiendo que no ha sido motivada por principios fundamentales ni construida a partir de ellos. Nació de la necesidad inmediata de describir y explicar un conjunto de observaciones; no difiere en eso mucho de la mecánica cuántica (y del propio concepto de la materia oscura). Y digo que es limitada porque todavía no podemos aplicarla a todos los fenómenos pertinentes conocidos.

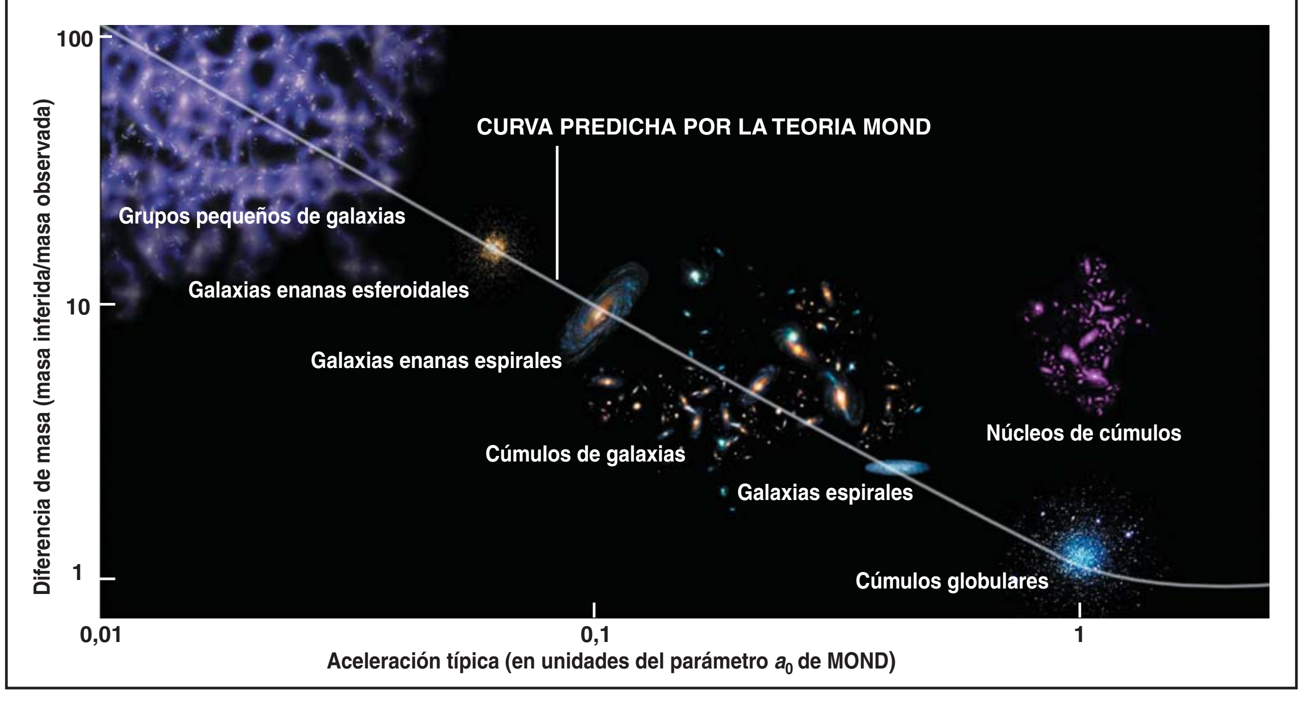
La razón principal es que MOND no esté enmarcada en una teoría que obedezca los principios de la relatividad, sea especial o general. Quizá resulte imposible; quizá se trate de una cuestión de tiempo. Hoy día, y a pesar de incontables esfuerzos, no se ha conseguido todavía que la física cuántica resulte compatible con la relatividad general.

Más allá de la teoría

Caen más allá del alcance actual de la teoría MOND los fenómenos que implican, por una parte, aceleraciones menores que a_0 (donde MOND desempeña su papel) y, por otra, velocidades extremas o gravedades muy intensas (donde la relatividad es necesaria). Los agujeros negros cumplen el segundo criterio, pero no el primero: para que la aceleración cerca de un agujero ne-

LA TEORIA MOND EN LOS SISTEMAS GALACTICOS

Todos los tipos de sistemas galácticos —cuyos tamaños van del alcanzado por los cúmulos globulares de estrellas al de los grupos y cúmulos de galaxias pasando por galaxias enanas— presentan una discrepancia entre la masa observada y la inferida. Esta discrepancia es inversa a la aceleración característica, justo como la teoría MOND predice. Los modelos de materia oscura no encuentran razones para esta correlación. El principal fallo de la teoría MOND se produce en los núcleos de los grandes cúmulos de galaxias.



DON DIXON

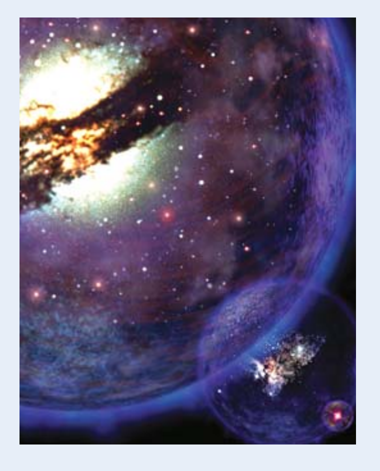
No es una idea descabellada

La teoría MOND no se inscribe en el cuadro conceptual dominante hoy en cosmología, pero dista de ser una idea descabellada

Anthony Aguirre

Aunque la gran mayoría de los astrónomos piensa que la materia oscura existe realmente, otra hipótesis, una modificación de la dinámica gravitatoria newtoniana, MOND, sobrevive desde que fuera propuesta en 1983. Tal y como Mordehai Milgrom expone en su artículo, la teoría MOND es capaz de reproducir un número impresionante de observaciones relacionadas con la dinámica de las galaxias. Las reacciones de los astrónomos se agrupan en tres categorías:

1. La teoría MOND es tautológica. Sólo explica aquello para lo que fue pensada. Ha atinado con algunas predicciones fortuitas, pero sus proponentes han exagerado el éxito.
2. La teoría MOND describe una sorprendente, incluso misteriosa, regularidad en la formación y evolución de las galaxias. La teoría gravitatoria estándar es todavía aplicable y la materia oscura existe, pero de alguna forma imita a la teoría MOND. Cuando se aplique MOND en detalle a galaxias poco habituales o a otros sistemas distintos de las galaxias, fracasará.
3. La teoría MOND sustituye a la dinámica newtoniana en ciertas condiciones. Es un aspecto de la teoría de la dinámica gravitatoria que reemplazará a la teoría general de la relatividad de Einstein.



El primer punto de vista, aunque poco generoso, ha sido la postura adoptada por la mayoría de los astrofísicos a lo largo de casi toda la historia de la teoría MOND. En los últimos años, sin embargo, hay menos justificaciones para un rechazo tan abierto. Las muy numerosas predicciones de la teoría MOND se han confirmado. Y muchos de esos estudios los han realizado investigadores críticos, o al menos neutrales, ante las hipótesis de Milgrom. Más aún, la teoría MOND reproduce las propiedades de las galaxias al menos tan bien como los modelos de la materia oscura, a pesar de que estos últimos describen algunos aspectos cruciales de la formación galáctica con una argumentación *ad hoc*.

Impresiona más todavía que la teoría MOND pueda predecir los detalles de la rotación de una galaxia tan sólo con la distribución de la materia visible y la premisa de una relación fija entre la masa y la luminosidad —los modelos de materia oscura no son capaces de tanto—. Estas predicciones y las observaciones que las contrastan superan con creces lo que cabía abordar cuando se formuló la teoría MOND. No es una tautología.

Por otra parte, la teoría estándar de la materia oscura presenta grandes dificultades cuando se aplica a las galaxias. Predice, por ejemplo, que la materia oscura de los núcleos galácticos debería ser bastante más densa de lo que se observa. Estos problemas podrían deberse sólo a limitaciones de cálculo; se carece de computadores tan potentes como para simular una galaxia entera. Pero muchos teóricos consideran que estas discrepancias obligan a modificar las propiedades de la materia oscura.

Los éxitos de la teoría MOND y las dificultades de la materia oscura han movido a algunos a pasar del primer punto de vista al segundo. No obstante, muy pocos han pasado del primero o del segundo al tercero. ¿Por qué? Creo que hay tres razones.

Primero, los partidarios de la teoría MOND y los que se oponen a ella concuerdan en que esta teoría es sólo una modificación de la dinámica de Newton. A pesar de algunos esfuerzos, los proponentes de MOND tienen aún que formularla de manera que pueda aplicarse a fenómenos posnewtonianos como las lentes gravitatorias y la expansión cosmológica. O bien esta teoría ampliada no existe, o hay una dificultad intrínseca en su enunciación. Sea cual sea el motivo, MOND no ha podido enfrentarse a algunas pruebas críticas; por tanto, ni las ha superado ni ha fracasado ante ellas.

En segundo lugar, no está claro que la teoría MOND funcione en sistemas que no sean galaxias. Por ejemplo, sus predicciones acerca de la temperatura del gas caliente en los cúmulos de galaxias no concuerdan en absoluto con las observaciones, a no ser que estos cúmulos se hallen dominados —¡cómo no!— por materia que no se ha detectado. Se espera (así lo hacen los proponentes de la teoría) que esa materia perdida la compongan estructuras bariónicas reconocibles pero difíciles de detectar, digamos estrellas muy pequeñas y gas templado. No está descartada esta posibilidad hoy día, pero es cierto que existen restricciones observacionales y teóricas. Y resulta bastante perturbador que se tenga que recurrir a una materia oscura (aunque sea prosaica) para proteger a una teoría pensada inicialmente para eliminar la materia oscura.

La tercera razón, relacionada con las otras dos, es que la teoría estándar de la materia oscura ha cosechado triunfos impresionantes en los últimos años. Las simulaciones numéricas predicen una distribución espacial del gas intergaláctico que concuerda a la perfección con las observaciones. Distintas formas de estimar la cantidad de materia oscura presente en los cúmulos conducen a un mismo resultado. El crecimiento teórico predicho de las estructuras relaciona correctamente la distribución de galaxias que observamos hoy a grandes escalas con las pequeñas fluctuaciones de temperatura de la radiación del fondo cósmico de microondas de hace trece mil millones de años.

¿Qué deben hacer los astrónomos? Los partidarios de las hipótesis de Milgrom deberían continuar trabajando para encontrar una teoría fundamental de la que dimane, ya que sin ella los físicos no se apartarán fácilmente del paradigma estándar. En cuanto a los demás, creo que les será productivo valerse de MOND como de una regla práctica, se acepte o no una modificación de la dinámica newtoniana. Quizá deberíamos denominar mejor a MOND “fórmula de ajuste de Milgrom”, para recalcar que la utilizamos como una herramienta útil mientras nos reservamos el derecho de juzgar si la física común está equivocada o no.

En caso de que la relatividad general sea correcta y la materia oscura real, conforme mejore la precisión de las medidas la fórmula de ajuste de Milgrom acabará por fallar. Mientras tanto, proporcionará un sucinto resumen de nuestros conocimientos acerca de la formación y evolución de las galaxias.

Anthony Aguirre es un cosmólogo teórico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Es el autor principal de dos estudios críticos sobre la teoría MOND.

SLIM FILMS

gro no supere a_0, tendría que ser mayor que el propio universo observable. La luz que se propaga en los campos gravitatorios de los sistemas galácticos, sin embargo, sí satisface los dos criterios. La teoría MOND no puede tratar adecuadamente su movimiento, propio de las lentes gravitatorias [*véase* “Lentes gravitatorias y materia oscura”, por Joachim Wambsganss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2002]. Las observaciones de lentes gravitatorias también exhiben el problema de la incongruencia de la masa total, como las de la dinámica galáctica. Pero no sabemos todavía si la teoría MOND es capaz de explicar la disparidad en ambos casos.

Un segundo sistema que necesita a MOND y a la relatividad a la vez es el universo en su globalidad. MOND no puede tratar problemas cosmológicos. Esta incapacidad se extiende a las preguntas relativas a las estructuras incipientes del universo. MOND es aplicable a sistemas ya constituidos, separados de la sopa cosmológica global, pero no puede describir los primeros momentos, previos a que los sistemas galácticos adquiriesen una identidad diferenciada.

Se ha esbozado cómo se podrían formular estos fenómenos en una teoría MOND. Por ejemplo, Robert H. Sanders, del Instituto Astronómico Kapteyn de Groningen, y Adi Nusser, del Instituto Technion-Israel, han ideado guiones de formación galáctica bajo la hipótesis MOND, complementada con premisas de trabajo. Pero se debe resaltar que ninguno de estos esfuerzos será realmente fiable mientras no se disponga de una teoría de fondo sólida.

¿En qué dirección debemos apuntar para obtener esa teoría de fondo? Quizás una pista provenga del valor de a_0. Una aceleración de un angstrom por segundo por segundo trasladaría un cuerpo desde el reposo absoluto hasta casi la velocidad de la luz en el tiempo que lleva existiendo el universo. En otras palabras, a_0 coincide, más o menos, con el producto de dos constantes muy importantes: la velocidad de la luz y la constante de Hubble, el ritmo al que se expande en estos momentos el universo. También está muy cerca del valor de la aceleración (que tiene un origen aparte) causada por la energía oscura. Esta proximidad numérica, si no se debe a una mera casualidad, nos está diciendo que la cosmología influye, de una u otra forma, en alguna ley local de la física, como la ley de la inercia, y crea así el efecto MOND, o que un agente común afecta tanto a la cosmología como a la física local y deja el mismo rastro en las dos.

Resistencia

MOND parece dar a entender que la inercia —la respuesta de un cuerpo a una fuerza— no es una propiedad intrínseca de los cuerpos, sino que se adquiere por medio de la interacción entre los cuerpos y el universo como un todo. Concuerda en esto con una vieja idea, el principio de Mach, que atribuye la inercia a tal interacción.

La física conoce muchos casos en que la inercia efectiva de las partículas no es una propiedad inherente de éstas, sino el producto de la interacción con un medio de fondo. Por ejemplo, los electrones se comportan a veces en los sólidos como si esos cuerpos en que se hallan inmersos les modificaran la inercia. ¿Y si un efecto similar fuese el responsable de la inercia propiamente dicha? En tal caso, ¿cuál sería el agente que impide la aceleración y genera con ello la inercia?

El vacío quizás. El vacío es lo que queda tras aniquilar toda la materia (o su equivalente, la energía) que se pueda. De acuerdo con la teoría cuántica, el residuo no es la nada, sino una representación mínima de todas las clases de energía. La interacción del vacío con las partículas podría contribuir a la inercia de los objetos. Llama la atención que el vacío también entre en la cosmología, como una de las explicaciones de la materia oscura. No obstante, todavía no se sabe si el vacío puede ser el responsable absoluto de la inercia o si explica la teoría MOND.

Muchos sostienen que, aunque MOND reproduce correctamente la fenomenología galáctica, no constituye una verdad fundamental. Si bien la teoría MOND vale quizá como un resumen de lo que observamos en la naturaleza, dicen, todas sus relaciones y regularidades derivarán un día de la complejidad del paradigma de la materia oscura. El pasado año Manoj Kaplinghat y Michael S. Turner anunciaron que en los modelos de materia oscura aparece de forma natural una aceleración característica similar a a_0. Según su formulación, los modelos predicen la generación de un cierto tipo restringido de halos de materia oscura alrededor de las galaxias.

Pero yo he señalado después que esa formulación no es viable. Kaplinghat y Turner basaron su trabajo en ciertas aproximaciones crudas que divergen de lo observado en los halos de materia oscura y de los resultados de las simulaciones numéricas detalladas del comportamiento de ésta. Esas simulaciones, en su estado actual, no reproducen ningún aspecto de la fenomenología MOND. Además, los resultados de los dos investigadores sólo abarcan unos pocos éxitos de la teoría MOND. No obstante, es posible que la teoría MOND tenga su origen en el paradigma de la materia oscura, pero de otra forma. El tiempo lo dirá.

Mientras tanto, se continúa trabajando para comprender las consecuencias observables de la teoría MOND y mejorar la teoría misma, con contribuciones de Sanders, Jacob D. Bekenstein y Stacy S. McCaugh. MOND sigue siendo la alternativa a la materia oscura con más éxito. La más duradera también. Las observaciones, lejos de rechazarla, parecen primarla sobre la materia oscura. Aunque está justificado el escepticismo, deberemos mantener nuestras mentes abiertas mientras no haya pruebas definitivas a favor de la materia oscura o de una de sus alternativas.

Bibliografía complementaria

HOW COLD DARK MATTER THEORY EXPLAINS MILGROM’S LAW. Manoj Kaplinghat y Michael S. Turner en *Astrophysical Journal*, vol. 569, n.º 1, págs. L19-L22; 10 de abril de 2002.

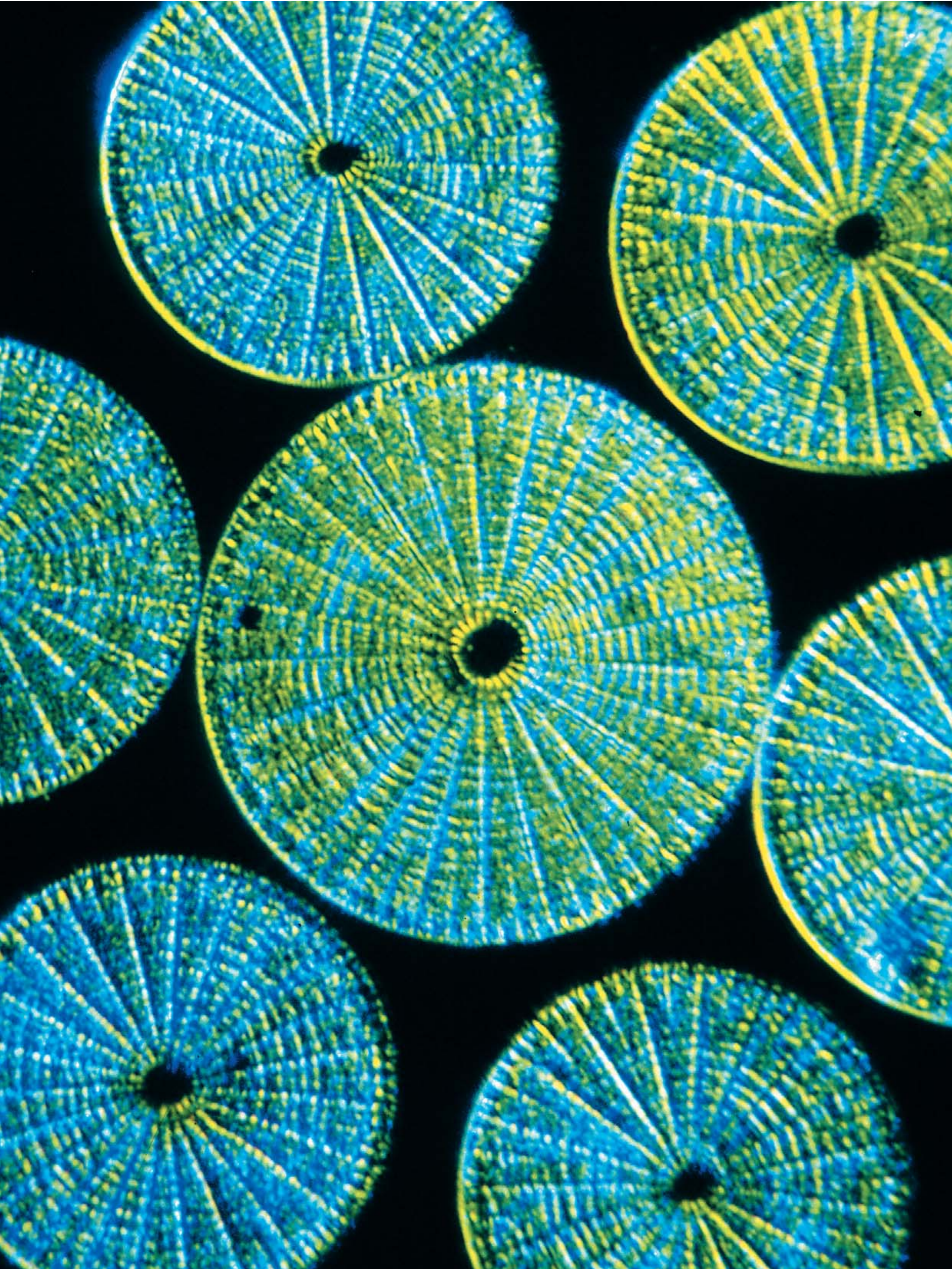
MODIFIED NEWTONIAN DYNAMICS AS AN ALTERNATIVE TO DARK MATTER. Robert H. Sanders y Stacey S. McCaugh en *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 40; 2002.

1. **LAS DIATOMEAS** son los gigantes del fitoplancton. La especie fotografiada aquí, *Actinocyclus* sp., mide hasta un milímetro de diámetro.

El bosque invisible de los océanos

El fitoplancton marino desempeña un papel decisivo en la regulación del clima. ¿Podría combatir el calentamiento global?

Paul G. Falkowski



Cada gota de agua a menos de cien metros de la superficie del océano lleva miles de ejemplares de una flora microscópica y flotante, el fitoplancton. Estos organismos unicelulares —entre los que se encuentran las diatomeas y otras algas— ocupan tres cuartas partes de la superficie del planeta; sin embargo, cuentan con menos del 1 por ciento de los 600.000 millones de toneladas de carbono de la biomasa fotosintética. Pese a tal insustancialidad, ese bosque casi invisible afecta hondamente a los ciclos naturales fundamentales del planeta.

Uno de los efectos de más envergadura del fitoplancton marino es su influencia en el clima. Hasta hace poco, sin embargo, pocos apreciaban hasta qué punto esos diminutos habitantes del océano eran capaces de extraer de la atmósfera el gas de invernadero dióxido de carbono (CO_2) y de almacenarlo en mar abierto. Nuevas observaciones mediante satélites y amplias investigaciones oceanográficas finalmente han revelado cuán sensibles son a un cambio global de temperatura, a la circulación del océano y a la disponibilidad de nutrientes.

Sabedores de estos descubrimientos, ciertos investigadores, empresarios y políticos están tentados de manipular las poblaciones de fitoplancton añadiendo nutrientes a los océanos; querrían así mitigar el calentamiento global. Un experimento efectuado este mismo año, a lo largo de dos meses, en el océano Antártico confirmó que inyectar en las aguas superficiales trazas de hierro estimulaba el crecimiento del fitoplancton; no obstante, la eficacia del programa de fertilización comercial del océano está todavía en discusión. Explorar cómo pueden alterar las actuaciones humanas el papel del fitoplancton en el ciclo del carbono del planeta es fundamental a la hora de predecir las consecuencias ecológicas a largo plazo.

Verde visión

Se sabe desde hace tiempo que las plantas desempeñan un papel importante en la extracción del CO_2 de la atmósfera. Así es desde hace unos tres mil millones de años, desde que se desarrolló en las cianobacterias, el tipo de fitoplancton más abundante, la fotosíntesis oxígena, o productora de oxígeno. El fitoplancton y todas las plantas terrestres —que evolucionaron desde el fitoplancton hace unos 500 millones de años— escinden las moléculas de agua en átomos de hidrógeno y oxígeno gracias a la energía solar. Como producto residual se desprende el oxígeno que posibilita la vida animal en la Tierra. El ciclo del carbono del planeta (y, en gran parte, el clima) depende de los organismos fotosintéticos que utilizan el hidrógeno para convertir el carbono inorgánico del CO_2 en materia orgánica (el azúcar, los aminoácidos y demás moléculas biológicas que constituyen sus células).

No era fácil de medir la conversión del CO_2 en materia orgánica (la producción primaria). Hasta hace unos cinco años, la mayoría de los biólogos subestimaba la contribución del fitoplancton en comparación con la de las plantas terrestres. En la segunda mitad del siglo XX, los especialistas en oceanografía biológica hicieron miles de mediciones de la productividad fitoplanctónica. Pero estos datos se repartían de una forma tan irregular por el mundo, que para cualquier mes o año sólo cubrían una parte de los mares pequeñísima. Incluso con la ayuda de modelos matemáticos para rellenar los huecos, las evaluaciones de la productividad primaria mundial no resultaban fiables.

La situación cambió en 1997, cuando la NASA lanzó el Sensor Marino de Campo Ancho, el primer satélite equipado para observar las poblaciones del fitoplancton de todo el planeta semana a semana. Ve esos organismos gracias a que la fotosíntesis oxigénica opera solamente en presencia de la clorofila *a*. Este y otros pigmentos absorben las bandas de luz azul y verde del espectro lumínico; las moléculas de agua, en cambio, las dispersan. Cuanto más fitoplancton tome la luz del sol en una zona, tanto más oscura le resultará ésta a un observador situado en el espacio. Una simple medida por satélite del porcentaje de luz verdeazulada de los océanos es un método para cuantificar la cantidad de clorofila y, por tanto, la abundancia de fitoplancton.

Las imágenes por satélite de la clorofila, unidas a miles de medidas de la productividad, han mejorado las evaluaciones matemáticas de la producción primaria global en los océanos. Aunque varios grupos de investigación adoptaron enfoques analíticos distintos, en 1998 llegaron todos a una misma conclusión: cada año el fitoplancton lleva en sus células de 45.000 a 50.000 millones de toneladas de carbono inorgánico, casi el doble de la cantidad que arrojaban incluso los cálculos previos menos conservadores.

El mismo año, mis compañeros Christopher B. Field y James T. Randerson, de la Institución Carnegie de Washington, y Michael J. Behrenfeld, de la Universidad Rutgers, y yo decidimos poner estas cifras en un contexto mundial construyendo una base de datos obtenidos por satélite y levantando mapas que permitieran comparar la producción pri-

Resumen/*Reguladores climáticos*

- Los rápidos ciclos biológicos del fitoplancton marino transfieren el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y de las capas superiores del océano, donde retiene calor, al fondo del mar; allí permanecerá aislado hasta que las corrientes lo devuelvan a la superficie centenares de años después.
- Si todo el fitoplancton marino del mundo muriera hoy, en pocos siglos la concentración de CO_2 en la atmósfera aumentaría en unas 200 partes por millón, un 35 por ciento.
- Añadir ciertos nutrientes a la superficie del océano puede fomentar poderosamente el crecimiento del fitoplancton y, con ello, el consumo de CO_2 por la fotosíntesis, pero se duda aún de que las fertilizaciones artificiales incrementen el almacenamiento de CO_2 en el fondo del océano.
- Un aumento artificial del fitoplancton tendría inevitables e imprevisibles consecuencias en los ecosistemas naturales marinos.

PETER PARKS *imagequest3d.com (página anterior)*

maria de los océanos con la de los continentes. Las investigaciones anteriores indicaban que las plantas terrestres asimilaban hasta 100.000 millones de toneladas de carbono inorgánico al año. Para sorpresa de la mayoría de los ecólogos, nuestros análisis de los datos de los satélites revelaron que asimilaban tan sólo 52.000 millones. En otras palabras, el fitoplancton extraía casi tanto CO_2 de la atmósfera y de los océanos mediante la fotosíntesis como todos los árboles, pastos y demás plantas terrestres juntos.

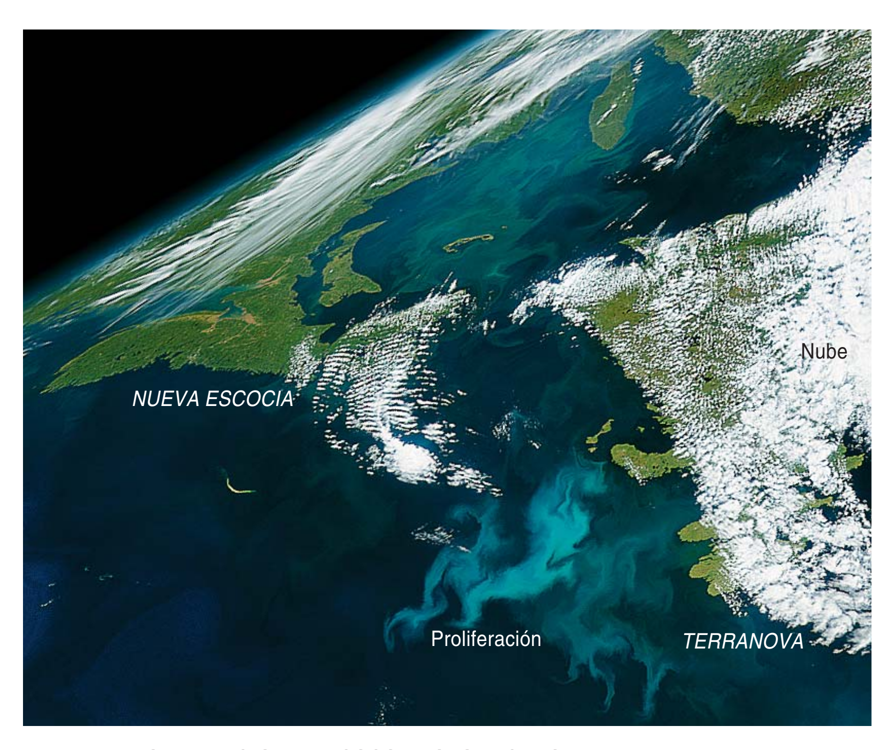
Hundirse y desaparecer

Una vez se supo que la productividad real del fitoplancton duplicaba la que se creía, los biólogos hubieron de reconsiderar el destino final del fitoplancton muerto, que afecta fuertemente al ciclo del carbono y del gas CO_2 del planeta. Como el fitoplancton dirige casi toda la energía que recoge del sol hacia la fotosíntesis y la reproducción, la población marina entera puede reponerse por sí misma en una semana. Por el contrario, las plantas terrestres deben invertir abundante energía en elaborar el tallo, las hojas y las raíces, y tardan un promedio de 20 años en reemplazarse a sí mismas. Cuando las células del fitoplancton se dividen —cada seis días por termino medio— la mitad de las células hijas mueren o las devora el zooplancton, animales minúsculos que a su vez alimentan a gambas, peces y otros carnívoros mayores.

El conocimiento de que el rápido ciclo de vida del fitoplancton es la clave de su influencia en el clima ha inspirado un programa científico internacional, el Estudio Conjunto Mundial del Flujo Oceánico (JGOFS). A comienzos de 1998, los investigadores del JGOFS emprendieron la cuantificación del ciclo del carbono oceánico; en su transcurso, la materia orgánica de las células muertas del fitoplancton y la fecal de los animales que lo consumen se hunden y acaban siendo ingeridos por microorganismos que convierten todo ello de nuevo en nutrientes inorgánicos, el CO_2 incluido. La mayor parte de este reciclado se efectúa en la capa del océano iluminada por el sol, donde el CO_2 se encuentra disponible al instante para que se lo fotosintetice o la atmósfera lo reabsorba. (Se intercambia el volumen entero de gases de la atmósfera con los gases disueltos en la parte superior del océano cada seis años más o menos.)

La materia orgánica que más influye en el clima es la que se sumerge hasta las profundidades del océano antes de descomponerse. Cuando se desprende por debajo de los 200 metros, el CO_2 aguanta más tiempo porque las bajas temperaturas —y la alta densidad— del agua impiden que se mezcle con el agua más tibia de encima. Así, con esta "bomba biológica", el fitoplancton retira CO_2 de las aguas superficiales y la atmósfera y lo almacena en el fondo del océano. El año pasado Edward A. Laws, de la Universidad de Hawai, otros tres investigadores del JGOFS y yo publicamos que el material bombeado hacia las profundidades del mar sumaba entre siete y ocho de los miles de millones de toneladas de carbono que el fitoplancton asimila cada año (alrededor de un 15 por ciento).

En unos centenares de años, casi todos los nutrientes depositados en el fondo del mar habrán encontrado su camino de vuelta a las soleadas aguas superficiales, impulsados por los afloramientos de agua y otras corrientes oceánicas, donde estimularán el crecimiento del fitoplancton. Este ciclo mantiene la bomba biológica en un equilibrio



2. UNA PROLIFERACION DE COCOLITOFORACEAS se extiende como una mancha a través de varios centenares de kilómetros cuadrados del Atlántico, azul oscuro, al sur de Terranova. Tales proliferaciones naturales suceden al final de la primavera, cuando las corrientes llevan los nutrientes del fondo del océano a las soleadas aguas superficiales.

CORTESIA DE THE SEAWIFS PROJECT, CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD DE LA NASA Y ORBIMAGE

El autor

PAUL G. FALKOWSKI es profesor del Instituto de Ciencias Marinas y Costeras y del departamento de geología de la Universidad Rutgers. Se doctoró en la Universidad de la Columbia Británica en 1975. Tras sus estudios posdoctorales en la Universidad de Rhode Island, entró a formar parte del Laboratorio Nacional de Brookhaven en 1976, dentro de la recién formada división oceanográfica. En 1997, junto con Zbigniew Kolber, de la Universidad Rutgers, inventó un fluorómetro que mide la productividad en tiempo real del fitoplancton. Al año siguiente se incorporó a la Rutgers, donde se centra en la coevolución de los sistemas biológicos y físicos.

La influencia del fitoplancton en el ciclo del carbono

El ciclo del carbono de la Tierra, según las cantidades relativas de dióxido de carbono (CO_2) que entren (*flechas amarillas*) y salgan (*flechas verdes*) de la atmósfera y de las capas superiores del océano, influye grandemente en el cambio climático. Los organismos vegetales que constituyen el fitoplancton desempeñan cuatro papeles cruciales en este ciclo. Incorporan al año unos 50.000 millones de toneladas de carbono en sus células durante la fotosíntesis, fomentada muchas veces por el hierro del polvo aventado (*1*). El fitoplancton también almacena temporalmente CO_2 en las profundidades oceánicas gracias a la bomba biológica: un 15 por ciento del carbono que asimila va al fondo del mar, donde se desprende en forma de CO_2 cuando se descomponen las células muertas (*2*). Al cabo de centenares de años, las corrientes ascendentes transportan el gas disuelto y otros nutrientes hasta las aguas superficiales iluminadas por el sol.

Una fracción muy pequeña de las células muertas no se recicla. Se incorpora a las bolsas de petróleo o a las rocas sedimentarias del fondo. Parte del carbono encerrado en las rocas escapa en forma de gas CO_2 y regresa a la atmósfera con las erupciones volcánicas tras millones de años de subducción y metamorfismo en el interior del planeta (*3*). La quema de los combustibles fósiles devuelve el CO_2 a la atmósfera; lo hace a un ritmo un millón de veces más deprisa (*4*). El fitoplancton marino y los bosques terrestres no pueden incorporar el CO_2 la velocidad que se requería para mitigar ese incremento; la consecuencia ha sido el desequilibrio del ciclo global del carbono y el calentamiento del planeta. Hay quienes han pensado en corregir esa descompensación fertilizando artificialmente los océanos con soluciones diluidas de hierro que potencien la fotosíntesis del fitoplancton y la bomba biológica.



natural. En él, la concentración atmosférica de CO_2 es 200 partes por millón inferior a la que habría de no darse dicho fenómeno; se trata de un factor importante: la concentración de CO_2 actual es de unas 365 partes por millón.

A lo largo de millones de años, sin embargo, la bomba biológica va sufriendo lentas pérdidas. Alrededor de un 0,5 por ciento de las células fitoplanctónicas muertas y de la materia fecal se integra en los sedimentos del fondo y no se recicla en las capas superiores del océano. Alguno de estos carbonos se incluye en rocas sedimentarias, en esquistos negros, la mayor reserva de materia orgánica del mundo. Una pequeña fracción forma depósitos de petróleo y gas natural: estos carburantes primarios de la industria mundial son restos fósiles de fitoplancton.

El carbono secuestrado en los esquistos y otras rocas vuelve a la atmósfera en forma de CO_2 sólo cuando éstas se sumergen en el interior de la Tierra al chocar las placas tectónicas en las zonas subducción. Allí, el calor y la presión extremos disuelven las rocas y fuerzan la salida de parte del CO_2, que las erupciones volcánicas liberarán finalmente.

Con la quema de combustibles fósiles entra de nuevo en circulación el carbono enterrado. Lo hace a una velocidad que supera un millón de veces la tasa en que lo liberan los volcanes. Los bosques y el fitoplancton no pueden absorber el CO_2 al mismo paso que se emite. La concentración atmosférica de este gas de invernadero aumenta, pues, con rapidez; casi con toda certeza, ha contribuido mucho al calentamiento global que se ha experimentado en los últimos 50 años.

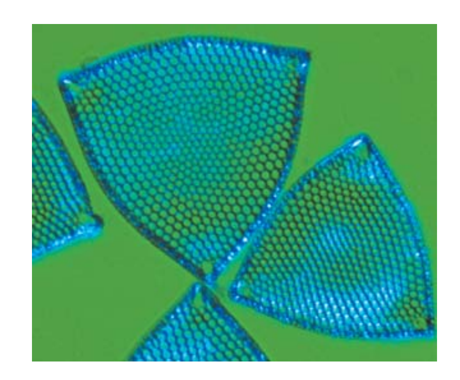
Cuando a principios del decenio de 1990 se abordó cómo paliar esa descompensación, se pensó en los océanos, que podrían llegar en principio a retener el CO_2 emitido por la quema de combustibles fósiles. Varios científicos y entidades privadas propusieron que se acelerasen de manera artificial las bombas biológicas; sería la forma de aprovechar esa capacidad adicional de almacenamiento. Hipotéticamente, esa aceleración se podría lograr por dos vías: añadiendo nutrientes a la superficie del océano o consiguiendo que los nutrientes no consumidos del todo se usasen con mayor eficacia. De una manera o de la otra, creían muchos, crecería más fitoplancton y se contaría con más células muertas que aportarían carbono al fondo del océano.

Fijaciones y límites

No se supo bien qué fertilizantes valdrían para el fitoplancton hasta que los grandes descubrimientos de los últimos 10 años esclarecieron la distribución natural de los nutrientes en los océanos. De los dos nutrientes primarios que todo fitoplancton necesita, el nitrógeno y el fósforo, se pensó durante mucho tiempo que el segundo era el que más costaba adquirir. Esencial para la síntesis de los ácidos nucleicos, sólo se encuentra en forma mineral, en fosfatos sumidos en las rocas continentales; entra por eso en los océanos de una única manera: con las escorrentías dulces, los ríos. El nitrógeno (N_2) es el gas más abundante de la atmósfera terrestre y se disuelve libremente en el agua de mar.

A principios de los años ochenta, sin embargo, algunos oceanógrafos comprendieron que habían sobrestimado la velocidad a la que el nitrógeno queda a disposición de los organismos. El fitoplancton, en su mayor parte, lo utiliza para construir las proteínas sólo después de fijado; en otras palabras: combinado con átomos de hidrógeno o de oxígeno para formar amonio (NH^{4+}), nitrito (NO_2^-) o nitrato (NO_3^-). Fijan casi todo el nitrógeno pequeños grupos de bacterias y cianobacterias que convierten N_2 en amonio; éste se libera en el agua de mar al morir y descomponerse los organismos.

En los entresijos de esa transformación química se encierran las razones por las que el crecimiento del fitoplancton está casi siempre limitado por la disponibilidad del nitrógeno. Para catalizar la reacción, bacterias y cianobacterias utilizan la nitrogenasa, enzima que recurre a otro elemento, el hierro, para transferir electrones. En las cianobacterias, la energía primaria para la fijación del nitrógeno deriva de un proceso distinto, que necesita de una



gran cantidad de hierro: la producción de adenosintrifosfato (ATP). Por estas razones, muchos oceanógrafos piensan que el hierro controla la cantidad de nitrógeno que el fitoplancton puede fijar.

A mediados del decenio de 1980, John Martin, un químico de los Laboratorios Marinos de Moss Landing, en California, expuso la hipótesis de que la escasez de hierro en muchos mares restringe considerablemente la producción de fitoplancton. Midió con métodos sumamente sensibles la abundancia del metal y descubrió que la concentración en el Pacífico ecuatorial, el Pacífico noreste y el océano Antártico es tan baja, que nunca se consumen del todo el fósforo y el nitrógeno de sus aguas superficiales.

Al principio se recibió con cierto escepticismo la hipótesis del hierro propuesta por Martin, en parte porque unas mediciones anteriores del océano, que luego se vio estaban contaminadas, reflejaban una abundancia de hierro. Pero Martin y sus colaboradores resaltaron que la vía, casi exclusiva, por la que el hierro llega a las aguas superficiales del océano es con el polvo arrastrado por el viento. Como consecuencia, la concentración de este elemento fundamental rara vez excedía, en extensas regiones oceánicas muy alejadas de los continentes, 0,2 partes por millón; es decir, entre un cincuentavo y una centésima de la concentración del fosfato o del nitrógeno inorgánico fijado.

Una prueba histórica, enterrada en las capas de hielo de la Antártida, también apoyaba la hipótesis de Martin. El núcleo del hielo de Vostok, un registro de los últimos 420.000 años, mostraba que durante las eras glaciales la cantidad de

DAVID FIERSTEIN (*izquierda*); PETER PARKS *imagequest3d.com* (*Triceratium*)



DAVID FIERSTEIN (*ilustraciones*); RON NICOLAYSEN (*fotografía*)

hierro fue más elevada y el tamaño medio de las partículas de polvo claramente mayor que en épocas más cálidas. De ello se infería que los continentes eran secos y la velocidad del viento grande durante las glaciaciones, razón por la cual se introducía entonces más hierro y polvo en la atmósfera que en los períodos interglaciales.

Martin y otros investigadores también observaron que, cuando la cantidad de polvo era mayor, el CO_2 abundaba menos en la atmósfera, y viceversa. Esta correlación señalaba que el mayor aporte de hierro a los océanos en los momentos más intensos de las glaciaciones estimulaba la fijación de nitrógeno y la utilización de los nutrientes por parte del fitoplancton. El consiguiente incremento en la productividad del fitoplancton pudo potenciar la bomba biológica, que extraería así de la atmósfera más CO_2.

La fuerte reacción del fitoplancton al cambio de condiciones durante las glaciaciones tuvo lugar a lo largo de miles de años, pero Martin quería saber si cambios de menor monta no dejarían su huella en un intervalo de días. En 1993, sus colaboradores se encargaron del primer experimento de manipulación del mar abierto: vertieron hierro directamente al Pacífico ecuatorial. Los tanques del buque científico contenían unos cien kilogramos de hierro disuelto en ácido sulfúrico diluido; poco a poco fue soltando la solución mientras cruzaba una zona de 50 kilómetros cuadrados de océano.

El resultado del primer experimento fue prometedor pero cuestionable, en parte porque los científicos sólo contaron con una semana para observar el fitoplancton en el mar. Cuando el mismo grupo repitió el experimento durante cuatro semanas en 1995, los resultados fueron claros: la fotosíntesis aumentó drásticamente con el hierro adicional y dio lugar a una proliferación de organismos que coloreó el agua de verde.

Después, tres grupos, de Nueva Zelanda, Alemania y los Estados Unidos, cada uno por su lado, demostraron inequívocamente que la adición de pequeñas cantidades de hierro estimulaba en el océano Antártico la productividad fitoplanctónica. El ensayo de fertilización más extenso se acometió durante enero y febrero de este mismo año: en el Experimento Antártico del Hierro (SOFeX), dirigido por el Instituto de Investigaciones del Acuario de la Bahía de Monterrey y los Laboratorios Marinos de Moss Landing, participaron tres barcos y 76 científicos, entre ellos cuatro de mis compañeros de la Universidad Rutgers. A tenor de los resultados preliminares, una tonelada de solución de hierro arrojada sobre 300 kilómetros cuadrados de mar decuplica en ocho semanas la producción primaria.

Estos hallazgos han convencido a la mayoría de los biólogos de

que el hierro estimula la proliferación del fitoplancton a latitudes elevadas. Conviene, empero, señalar que aún no está probado que este incremento de productividad potencie la bomba biológica o el almacenamiento de CO_2 en el océano. Según las predicciones matemáticas más actualizadas, aunque el fitoplancton incorporase en los próximos cien años todo el nitrógeno y fósforo que no se utiliza en las aguas superficiales del océano Antártico, sólo se captaría el 15 por ciento del CO_2 liberado en el consumo de combustibles fósiles.

Fertilización del océano

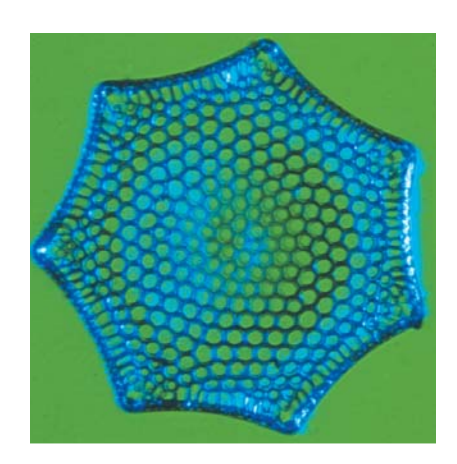
A pesar del sinfín de cuestiones pendientes sobre la fertilización de los océanos, algunos grupos, tanto públicos como privados, han dado pasos hacia su realización a gran escala. Una empresa ha propuesto que los barcos mercantes que navegan con regularidad por las rutas del sur del Pacífico siembren pequeñas cantidades de la mezcla fertilizadora. Otros han hablado de aportar nutrientes, incluidos el hierro y el amoníaco, a las aguas ribereñas mediante conducciones, para provocar allí la proliferación fitoplanctónica. Tres empresarios norteamericanos convencieron a las autoridades de que concediesen siete patentes de técnicas de fertilización oceánicas comerciales, y hay otra aún pendiente.

Todavía no está claro si los mecanismos de fertilización de los océanos resultarán técnicamente factibles. Para que la fertilización fuese efectiva habría que insistir año tras año durante décadas. Debido a que la circulación oceánica acabará por exponer toda el agua profunda a la atmósfera, el CO_2 adicional que almacenaría una bomba biológica potenciada volvería a la atmósfera a los pocos siglos de la última fertilización. Además, no es fácil domeñar un procedimiento de esta naturaleza. Los agricultores no pueden encerrar los nutrientes en un terreno; la fertilización de una parcela de turbulentas aguas oceánicas sería todavía menos manejable. Por esta razón, muchos oceanógrafos aducen que la fertilización a gran escala podría causar un daño a largo plazo que sería difícil, si no imposible, de reparar.

Preocupan en especial las alteraciones graves de la cadena trófica marina. Simulaciones con ordenador y estudios de proliferaciones fitoplanctónicas naturales indican que la intensificación de la producción primaria podría ocasionar localmente un agotamiento del oxígeno. En ocasiones, los microorganismos que se alimentan con las células fitoplanctónicas muertas, a medida que se hunden hacia el fondo marino, consumen el oxígeno más rápido de lo que la circulación del océano puede reponer. Los organismos a los que no les fuera posible escapar hacia aguas más ricas en oxígeno se asfixiarían.

Semejantes condiciones también estimulan el crecimiento de microorganismos que producen metano y óxido nitroso, dos gases causantes de efecto invernadero con una capacidad de atrapar el calor aún mayor que la del CO_2. Según la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera de Estados Unidos, una grave reducción de oxígeno y otros problemas provocados por las escorrentías cargadas de nutrientes han degradado ya más de la mitad de las aguas costeras del país, como la lamentable "zona muerta" del norte del Golfo de México. En docenas de otras regiones del mundo se está luchando por resolver problemas semejantes.

Incluso aunque reputasen tolerables las consecuencias involuntarias de la fertilización de los océanos, cualquier actuación de ese tipo debería también compensar la manera en que las plantas y los océanos reaccionarían en un mundo más cálido. La comparación de las observaciones de la abundancia del fitoplancton efectuadas por los satélites a principios de los años ochenta con las del decenio posterior indica que el océano está verdeciendo un poco, pero, como han apuntado varios investigadores, una productividad superior no garantiza que se vaya a guardar más carbono en el fondo del océano. Hasta puede suceder lo contrario. Las simulaciones por ordenador de los océanos y la atmósfera muestran que el calentamiento adicional aumentará la estratificación del océano al fluir



PETER PARKS *imagequest3d.com* (Triceratium)

el agua dulce de los glaciares y los hielos marinos fundidos sobre aguas saladas más densas. Esta estratificación enlentecería el transporte por las bombas biológicas del carbono desde la superficie al fondo del océano.

Nuevos sensores instalados en satélites observan ahora diariamente las poblaciones de fitoplancton; el conocimiento del comportamiento del fitoplancton dependerá de futuros experimentos de fertilización a pequeña escala. Mientras, científicos y gestores debaten la idea de alterar el clima por medio de grandes proyectos comerciales de fertilización de los océanos. Muchos investigadores creen que los beneficios que pudiesen reportar no compensarían las consecuencias, inevitables e imprevisibles, debidas a la alteración de los ecosistemas marinos. Sea como sea, tendría su gracia que la sociedad buscara en el fitoplancton la solución de los problemas creados, en parte, por la quema de sus antepasados fósiles.

Bibliografía complementaria

AQUATIC PHOTOSYNTHESIS. Paul G. Falkowski y John A. Raven. Blackwell Scientific, 1997.

THE GLOBAL CARBON CYCLE: A TEST OF OUR KNOWLEDGE OF THE EARTH AS A SYSTEM. Paul F. Falkowski *et al.* en *Science*, vol. 290, páginas 291-294; 13 de octubre de 2000.

THE CHANGING OCEAN CARBON CYCLE: A MIDTERM SYNTHESIS OF THE JOINT GLOBAL OCEAN FLUX STUDY. Dirigido por Roger B. Hanson, Hugh W. Ducklow y John G. Field. Cambridge University Press, 2000.

Neurotransmisores

El sistema cannabinoide endógeno

El sistema cannabinoide endógeno es un sistema de comunicación intercelular que está presente en prácticamente toda la escala animal. Se descubrió a partir del estudio de las dianas farmacológicas de los cannabinoides, los principios activos de la marihuana.

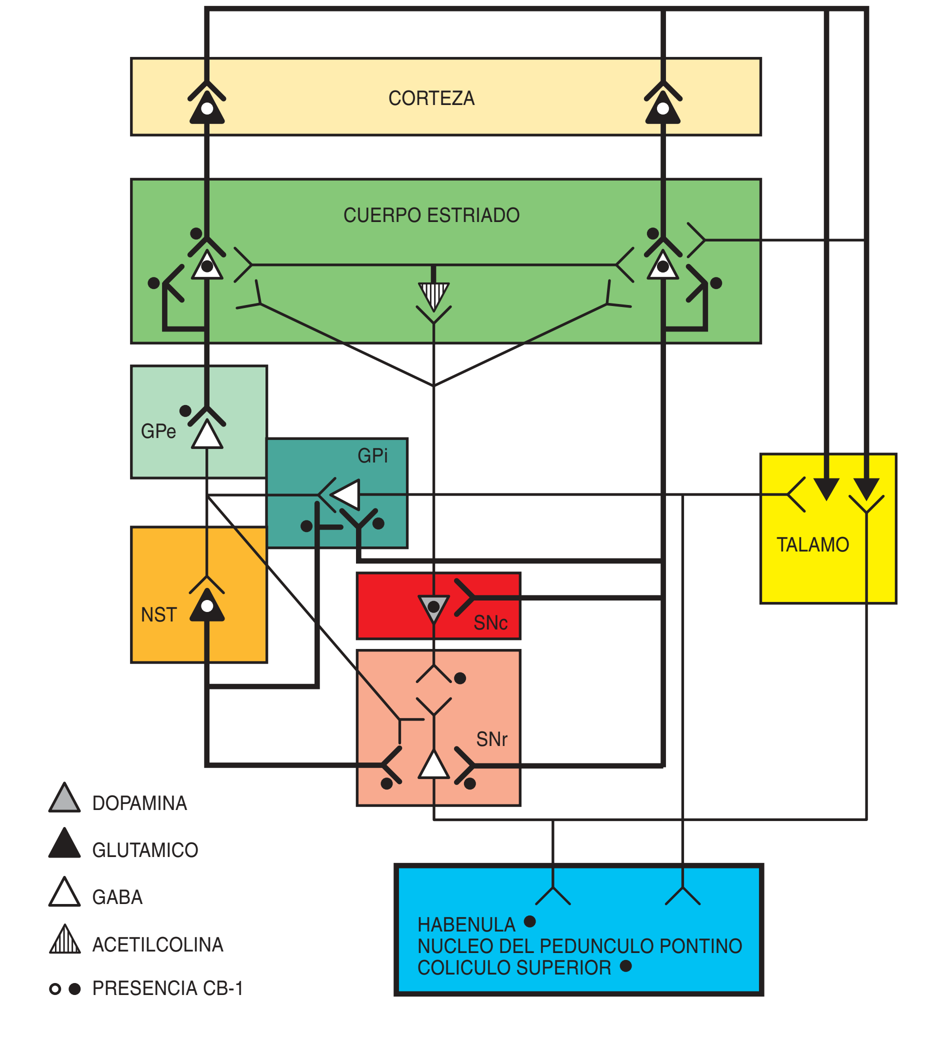
En el sistema nervioso está representado por el receptor CB-1 y sus ligandos, o "cannabinoides endógenos", anandamida, 2-araquidonilglicerol y palmitoiletanolamida. Postulados como neurotransmisores, debido a las acciones observadas *in vitro*, no se había conseguido demostrar hasta la fecha cuándo actuaban, dónde y por qué lo hacían, y en qué funciones fisiológicas intervenían en el animal vivo.

Esa incapacidad derivaba de su peculiar naturaleza química como moléculas transmisoras. Los cannabinoides endógenos son lípidos; no se almacenan en vesículas sinápticas, a diferencia de los neurotransmisores clásicos (dopamina, GABA o acetilcolina). De hecho, los cannabinoides endógenos proceden de moléculas que forman parte de la estructura de las membranas celulares; sólo se liberan ante estímulos muy determinados.

Así las cosas, nos planteamos identificar qué estímulos podrían, en el animal vivo, resultar en la liberación de estos transmisores. Para ello se escogió el cuerpo estriado, una de las regiones cerebrales que presenta mayor densidad de receptores para cannabinoides endógenos (CB-1). Esta estructura se eligió también por su papel en el control de la conducta motora (*véase la figura 1*), al pertenecer al sistema motor extrapiramidal, encargado, entre otras funciones, del control de la planificación y ejecución del movimiento.

Las alteraciones en las funciones del sistema motor extrapiramidal forman la base patogénica de la enfermedad de Parkinson o las coreas. Aunque todavía no acabamos de entender cómo procesa este sistema la información motora, sí conocemos con precisión los circuitos neuronales implicados y los neurotransmisores participantes en cada una de las distintas estaciones de procesamiento dentro del sistema extrapiramidal. Así, el cuerpo estriado recibe, entre otras, aferencias excitadoras de las cortezas sensoriomotoras y límbicas, proyectando a su vez hacia estructuras subcorticales como el globo pálido o la sustancia negra.

El procesamiento de la información dentro del cuerpo estriado está regulado por neuronas que utilizan transmisores moduladores (dopamina o ciertos neuropéptidos). La presencia de receptores CB-1 en las neuronas intrínsecas de proyección del cuerpo estriado sugería que el sistema cannabinoide endógeno podría añadirse a la lista de transmisores moduladores. Esta hipótesis venía respaldada por las acciones conocidas de los fármacos agonistas del receptor CB-1. La administración de agonistas CB-1,



1. Esquema de los circuitos de los ganglios basales, en los que participa el sistema cannabinoide endógeno (círculos) *regulando el control de la motricidad*

como el THC (principal componente activo de la marihuana), produce un complejo síndrome motor, en cierta forma similar al causado por el bloqueo de la transmisión dopaminérgica con neurolépticos: inmovilidad, catalepsia y rigidez.

Para demostrar la actividad del sistema cannabinoide endógeno en el cuerpo estriado recurrimos a la técnica de microdiálisis cerebral. Con esta técnica, en la que se introduce en el cerebro una pequeña cánula provista de una membrana semipermeable, es posible recuperar un dializado que contiene una pequeña fracción de las sustancias liberadas por las neuronas al medio extracelular, incluyendo todo tipo de neurotransmisores, en un animal vivo y que se mueve libremente.

La técnica de microdiálisis nos permitió observar que en el cuerpo estriado se libera al medio extracelular, en condiciones normales, una pequeña cantidad de anandamida y de palmitoiletanolamida, dos cannabinoides endógenos. Cuando se despolariza a las neuronas perfundiendo la cánula con una solución rica en iones potasio, se obtiene un incremento en la liberación de anandamida, pero no del resto de cannabinoides endógenos.

La liberación de anandamida era de origen neuronal, ya que se bloqueaba tanto en ausencia de iones calcio en el líquido de perfusión, como si se perfundía tetrodotoxina, un bloqueante de canales de sodio, que inhibe la génesis de potenciales de acción.

De acuerdo con nuestras conclusiones provisionales, la anandamida constituía el cannabinoide endógeno que aparecía en el cuerpo estriado en respuesta a un incremento en la actividad neuronal. Dado que uno de los principales neurotransmisores moduladores en el cuerpo estriado es la dopamina, y que en estudios previos habíamos comprobado la existencia de una comunicación cruzada entre los receptores de dopamina y el receptor CB-1, se estudió si la liberación de anandamida podría estar regulada por receptores de dopamina.

¿Qué observamos? Algo sorprendente. La estimulación del receptor D-2 de dopamina con el agonista selectivo quinpirole producía un incremento de hasta 8 veces en los niveles extracelulares de anandamida. Esta liberación no aparecía con agonistas del receptor D-1 (SKF 38393), siendo bloqueada por el pretratamiento con antagonistas del receptor D-2 (raclopride).

Dada la naturaleza facilitadora del movimiento observada tras tratamientos con agonistas dopaminérgicos, se postuló que la liberación de anandamida actuaría como un mecanismo homeostático capaz de equilibrar el exceso de señal dopaminérgica. Lo pudimos comprobar experimentalmente. Para ello, bloqueamos la capacidad de la anandamida para estimular el receptor CB-1 tratando a los animales con un antagonista específico de este receptor (SR 141716A), y provocándoles un incremento en la actividad locomotora mediante la administración del agonista dopaminérgico D-2 quinpirole. La supresión del mecanismo de contrarrespuesta cannabinoide con el antagonista CB-1 produjo una aceleración en el curso temporal de las acciones estimuladoras de la motricidad del quinpirole, así como un aumento en la potencia del mismo.

De nuestra investigación se desprende que el sistema cannabinoide endógeno funciona naturalmente como un modulador de la transmisión dopaminérgica en el cuerpo estriado, elevando a la anandamida a la misma categoría que otros mediadores químicos, como la propia dopamina. Así mismo abre nuevas perspectivas terapéuticas para el tratamiento de procesos en los que participa la neurotransmisión dopaminérgica, bien motores como la enfermedad de Parkinson o el síndrome de Gilles de la Tourette, bien neuropsiquiátricos, como la conducta adictiva o las psicosis.

SUSTANCIA NEGRA DEL MESENCEFALO
RECEPTOR D-2
DOPAMINA
RECEPTORES D-1/D-2
LIBERACION DE ANANDAMIDA
CUERPO ESTRIADO
+
RECEPTOR CB-1
–
FACILITACION DE LA CONDUCTA MOTORA: INICIO, SECUENCIACION. SINTAXIS, FINALIZACION.

2. La anandamida, liberada en respuesta a una estipulación del receptor dopaminérgico D-2, actúa contrarrestando un excesivo potencial de activación psicomotriz y equilibrando por tanto la motricidad. Un defecto en la transmisión cannabinoide se refleja en una hiperactividad motora de origen dopaminérgico, mientras que un exceso produciría una hipomotilidad similar a la derivada de un bloqueo de la transmisión dopaminérgica

FERNANDO RODRÍGUEZ DE FONSECA
y MIGUEL NAVARRO
Instituto Universitario
de Drogodependencias
Departamento de Psicobiología
Facultad de Psicología
Universidad Complutense
de Madrid.

Fitoplancton oceánico

Implicaciones del tamaño celular

El papel asignado al océano como sistema que controla el cambio del clima en la Tierra se percibe más claramente cuando se conoce su capacidad para absorber desde la atmósfera unas 2 gigatoneladas de dióxido de carbono al año. Esa enorme cantidad de carbono se retiene en las aguas profundas oceánicas durante suficiente tiempo como para que, a las escalas de la actividad humana, pueda considerarse eliminado de la atmósfera.

El proceso de transporte de carbono desde la atmósfera hacia las aguas profundas y los sedimentos oceánicos suele denominarse "bomba biológica oceánica". Se trata, en verdad, de un bombeo continuo mediado por la actividad de los organismos localizados en las aguas superficiales del océano.

Tras el proceso de fotosíntesis por parte del fitoplancton, parte del carbono asimilado es "exportado" hacia el fondo simplemente por la tendencia de las células a sedimentar, tendencia que se acentúa cuanto mayor es su tamaño. Este proceso de sedimentación constituye la vía principal mediante la cual el carbono viaja desde la atmósfera hacia las aguas profundas, una vez incorporado en el interior de las células del fitoplancton.

El proceso puede acelerarse si las células son ingeridas por los herbívoros y "empaquetadas" en partículas fecales de mayor tamaño y velocidad de sedimentación. Este bombeo biológico de carbono desde la atmósfera hacia el interior del océano contribuye a la reducción de la velocidad a la que actualmente se acumula el CO_2 en la atmósfera y justifica la importancia asignada al ecosistema oceánico en el control del cambio climático. Por el contrario, la dominancia del fitoplancton de pequeño tamaño implica una menor velocidad de sedimentación y, por tanto, una menor capacidad de exportación de carbono hacia las aguas profundas.

Además de energía luminosa, la actividad biológica del fitoplancton requiere el aporte de nutrientes inorgánicos. Se sabe que estos compuestos se generan en las aguas profundas como resultado de la descomposición y degradación de la materia orgánica sedimentada por parte de las bacterias heterotróficas. La actividad del fitoplancton se encuentra así comprometida por una característica del ecosistema oceánico (y de otros muchos ecosistemas acuáticos): donde hay luz no hay nutrientes y donde hay nutrientes no hay luz. Se requiere, por tanto, algún mecanismo que permita eliminar esta separación física, mecanismo que en el océano toma principalmente la forma de movimientos ascendentes de agua que transportan los nutrientes desde las aguas profundas y oscuras hasta las aguas superficiales e iluminadas.

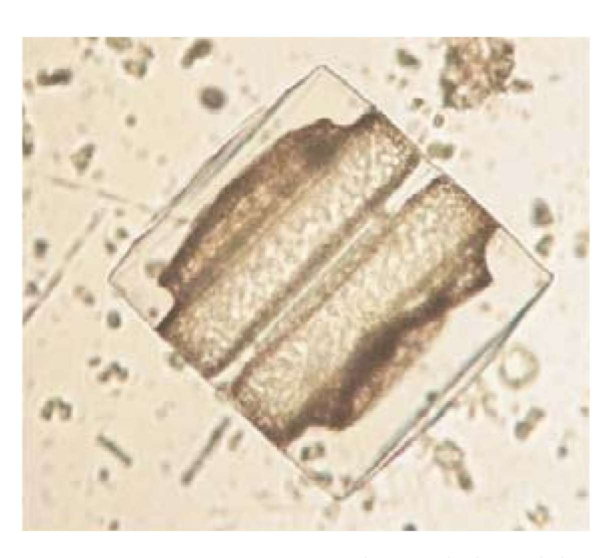


Imagen a microscopía óptica de una de las células fitoplanctónicas de mayor tamaño, Coscinodiscus *sp. La anchura del campo seleccionado es de 0,25 cm (Cortesía de Andreas Reul)*

El estudio de las relaciones entre los movimientos verticales de las masas de agua y la estructura de la comunidad fitoplanctónica ha sido el objeto de estudio de un grupo de científicos pertenecientes a las Universidades de Málaga, Cádiz y Jaén, al IMEDEA (centro mixto del CSIC y la Universidad de las Islas Baleares) y al Centro de Oceanografía de Southampton. El estudio se ha desarrollado en el contexto del proyecto europeo "Omega" (dentro del programa MAST de la UE y coordinado desde el IMEDEA por Joaquín Tintoré) y deriva de una campaña oceanográfica realizada a bordo del buque español de investigación oceanográfica "Hespérides" en la región nord-occidental del mar de Alborán.

El mar de Alborán reúne características que le confieren el valor de un océano en miniatura, ya que pueden encontrarse todos los fenómenos físicos oceánicos, aunque reducidos a una escala espacial que hace posible su estudio con un esfuerzo logístico y económico muy favorable.

La región de estudio (con una extensión de unos 100 × 100 km) encierra un conjunto de remolinos que funcionan a modo de chimeneas de ascenso y descenso de agua, estrechamente ligadas a un frente muy nítido que define el contacto entre masas de agua de diferentes características físicas y biológicas, remolinos que pueden aparecer, moverse y desaparecer muy rápidamente. De hecho, cuando se quiere ilustrar el carácter de estos remolinos "de mesoescala" se hace referencia a su equivalencia con la escala característica de las tormentas en la atmósfera: estructuras comparativamente pequeñas asociadas a frentes atmosféricos y que se desplazan y desaparecen con relativa rapidez.

Los resultados obtenidos muestran que, conforme aumenta la velocidad ascendente del agua, mayor es la proporción de células grandes en la comunidad de fitoplancton. En definitiva, se produce un efecto de retención de las células grandes en las aguas superficiales, debido a que su velocidad de sedimentación en la columna de agua queda compensada por la propia velocidad de ascenso del agua.

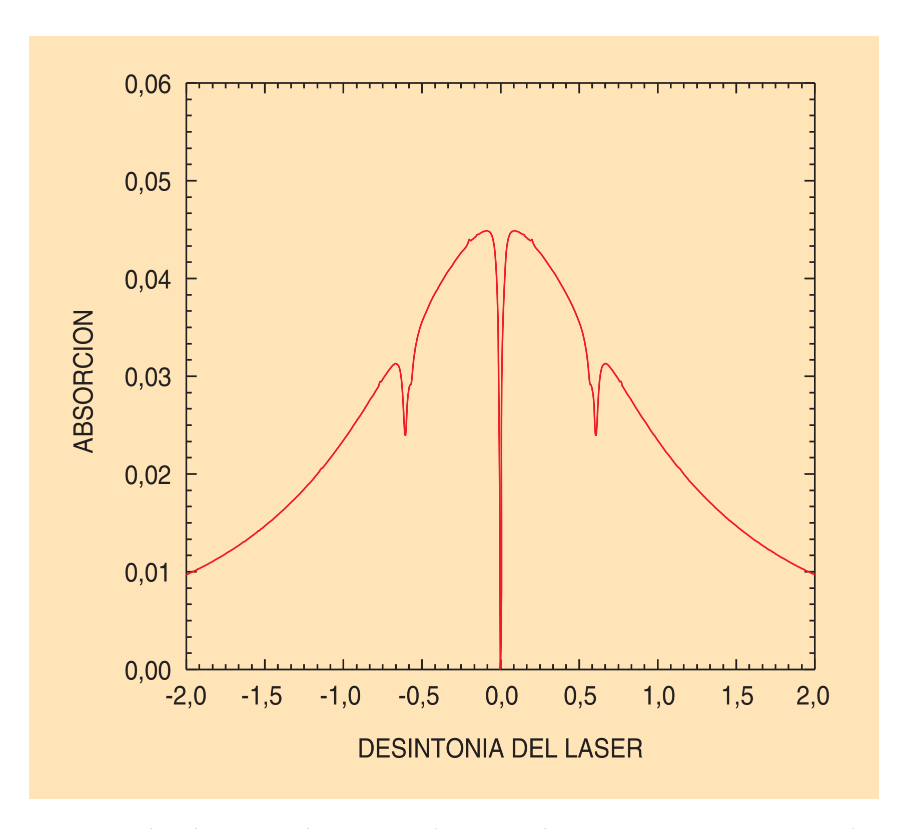
Esta observación no deja de ser una paradoja: los mismos movimientos verticales que aportan nutrien-

tes al fitoplancton, y que permiten predecir una elevada exportación de carbono hacia las aguas profundas, representan un freno a la sedimentación de las células que transportan ese carbono. De hecho, estaríamos en presencia de un proceso que reduce el rendimiento de la "bomba biológica" de carbono y que abre importantes cuestiones en relación con el papel del océano en el control del clima.

La cuestión no es tan simple, sin embargo. Coexisten, en estrecha proximidad, núcleos de ascenso y núcleos de descenso de agua, descenso que tiene lugar a velocidades tan altas o mayores que las de ascenso y que puede arrastrar grandes cantidades de carbono de forma muy rápida hacia las aguas profundas.

Por consiguiente, el problema debe plantearse en términos de balance para una determinada región. Allá donde la dinámica de masas de agua favorezca la existencia de estructuras físicas como las estudiadas en el mar de Alborán, es necesario analizar el balance entre los efectos de ascenso y hundimiento de aguas sobre las comunidades biológicas para poder cuantificar el efecto neto de los movimientos verticales de agua sobre el funcionamiento del ecosistema oceánico y, en particular, sobre la eficiencia de la "bomba biológica oceánica" como proceso regulador del clima.

FRANCISCO JIMÉNEZ
Dpto. de Ecología de la
Universidad de Jaén
JOAQUÍN TINTORÉ
Instituto Mediterráneo
de Estudios Avanzados, CSIC,
Universidad de las Islas Baleares
JAIME RODRÍGUEZ
Dpto. de Ecología de la
Universidad de Málaga



Espectro de absorción de un par de partículas en interacción con un láser. En resonancia (desintonía igual a cero), las dos partículas dejan de absorber luz, puesto que se encuentran en un estado oscuro. Los dos valles laterales son estados oscuros adicionales generados por la interacción entre las dos partículas. Estos nuevos estados permiten medir con gran precisión la interacción entre las partículas

Estados de superposición

Trampas para dos partículas

Una de las líneas de investigación primordiales en la física actual es la utilización de haces de luz láser para manipular átomos y conseguir nuevos estados de la materia (pensemos en el condensado de Bose-Einstein) o bien crear estados de superposición de una o varias partículas. En particular, crear, manipular y medir dichos estados reviste interés fundamental en el emergente campo de la computación cuántica.

Los estados de superposición son, por lo común, muy frágiles. Se destruyen con facilidad en la interacción con el entorno. La decoherencia, nombre que recibe ese fenómeno, puede producirse, por ejemplo, cuando los átomos de un gas caen de manera espontánea desde un nivel energético superior (estado excitado) a otro inferior. Para evitar que se produzca emisión espontánea, se recurre a una técnica que consiste en capturar los átomos en ciertos estados de superposición en los que dejan de absorber la luz.

En la mayoría de los casos, sólo un electrón del átomo (el electrón activo) desempeña un papel importante en la interacción luz-materia; dicho electrón es el ubicado en el estado de superposición. Mediante la técnica indicada, los átomos dejan de ser excitados y se evita, por consiguiente, la emisión espontánea. A los estados de superposición resultantes se les denomina estados oscuros. Se trata de un fenómeno de captura coherente de población ("coherent population trapping") descubierto, en los años setenta, por un grupo investigador de Pisa, que ha encontrado infinidad de aplicaciones en física: enfriamiento de átomos, reducción de la velocidad de la luz a unos pocos metros por segundo, óptica no lineal con unos pocos fotones, hasta completar un largo etcétera de fenómenos físicos.

En un trabajo reciente hemos descrito el mecanismo en cuya virtud pueden capturarse un par de partí-

culas simultáneamente en un estado oscuro mediante uno o varios haces de luz láser. Para capturar estas dos partículas (átomos con dos electrones activos, dos átomos neutros o dos iones) es necesario recurrir a diferentes aspectos fundamentales de la mecánica cuántica: indistinguibilidad de ambas partículas, carácter fermiónico, espín paralelo y principio de exclusión de Pauli.

De manera análoga a los métodos propios de física del estado sólido, hemos demostrado que es posible describir la interacción de las dos partículas y los haces de luz láser en términos de un hueco ("hole"). Con ello se simplifica sobremanera el problema. Estudiando la dinámica de ambas partículas en interacción con la luz hemos comprobado que, en realidad, es el hueco el que es capturado en el estado oscuro. Podemos aplicar la misma técnica para capturar los dos electrones activos de átomos alcalino-térreos como el calcio.

En resumen, hemos abordado el procedimiento para capturar dos partículas en un estado de superposición libre de decoherencia. Un estado que podemos alterar a voluntad modificando ligeramente las propiedades del láser requerido para su creación. Tales estados de superposición de dos partículas permiten, además, medir con precisión hasta ahora no alcanzada algunas propiedades de la interacción entre partículas; por ejemplo, la repulsión coulombiana entre los electrones activos del átomo (o de dos iones), así como la interacción entre dos átomos neutros enfriados y situados en una misma trampa, por señalar dos ejemplos.

J. Mompart,
R. Corbalán
y L. Roso
Departamento de Física
Universidad Autónoma
de Barcelona

El higo chumbo

Fuente de pigmentos

En las industrias alimentarias los colorantes se incorporan para normalizar la presentación de los productos y hacerlos más atractivos; junto con los antioxidantes, se trata de los aditivos más consumidos. La tendencia de las sociedades avanzadas a demandar productos sin manipular ha propiciado que se retome el interés por la investigación sobre los colorantes naturales.

La directiva 94/36/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de fecha 30 de junio, establece la regulación de los colorantes autorizados en la elaboración de productos alimenticios. Queda en ella muy restringido el empleo de los colorantes rojos de síntesis. Esta directiva se incorpora al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 2001/1995 de fecha 7 de diciembre, por el que se aprueba la lista positiva de aditivos colorantes autorizados para su uso en la elaboración de productos alimenticios, así como sus condiciones de utilización. En la actualidad son 43 los colorantes autorizados como aditivos alimentarios por el Consejo de la Unión Europea, todos con código E; de ellos, dieciséis son de origen vegetal (*véase la tabla*).

COLORANTES NATURALES DE ORIGEN VEGETAL PARA USO ALIMENTARIO

COLORANTE	CODIGO
Curcumina	E-100
Riboflavina, riboflavina-5'-fosfato	E-120
Acido carmínico, rojo cochinilla	E-120
Clorofilas y clorofilinas	E-140
Clorofilinas de Cu	E-141
Caramelo	E-150a
Carbón vegetal	E-153
β-caroteno	E-160a
Bixina, norbixina, annatto	E-160b
Pimentón, capsanteno, capsorrubeno	E-160c
Licopeno	E-160d
β-apo-8'-carotenal	E-160e
Luteína	E-161b
Cantaxanteno	E-161g
Betanina, rojo remolacha	E-162
Antocianinas	E-163

Consideraciones legislativas aparte, en los últimos años ha experimentado un notable crecimiento la investigación sobre colorantes naturales para uso alimentario, corriente que se enmarca dentro de los hábitos de la sociedad actual. La preferencia por los colorantes naturales se asocia a su imagen saludable y de buena calidad, frente a los de origen sintético, considerados como indeseables y nocivos.

A pesar de que el interés por los pigmentos naturales viene de siglos, el conocimiento sobre su distribu-



Higos chumbos de la variedad rojo-violeta en distintos estadios de madurez

ción, disponibilidad y propiedades es bastante limitado. Se estima que queda todavía un 70 % de plantas por investigar en este campo y que únicamente se posee un conocimiento exhaustivo del 0,5 % de ellas.

Las líneas de investigación dentro del campo de los colorantes naturales se encaminan en dos sentidos principales. Por un lado, la búsqueda de colorantes alternativos, dadas las deficiencias que muestran los que existen en el mercado (inestabilidad frente a la luz, calor o *p*H adverso); por otro, la búsqueda de nuevas fuentes de pigmentos, dirigiéndose ésta hacia cultivos exóticos, plantas forestales y flora marina. Esta segunda línea viene limitada por la disponibilidad de materia prima, que necesitará ser producida en suficiente cantidad para una extracción industrial de los pigmentos.

Estructura química de las betalaínas

Las limitaciones de uso en la industria alimentaria de los colorantes rojos sintéticos han llevado a la búsqueda de fuentes alternativas. Se nos ofrecen muy prometedores los frutos de la chumbera (*Opuntia ficus-indica*), especialmente los higos chumbos de color rojo-violáceo.

Los pigmentos presentes en los higos chumbos pertenecen a la familia de las betalaínas. Conviene resaltar que entre los colorantes aceptados por la Unión Europea está el *rojo remolacha* (E162). Con este nombre se comercializa el polvo procedente de la deshidratación de la remolacha roja (*Beta vulgaris*), cuya composición es básicamente betanina (pigmento rojo de la familia de las betalaínas). Las betalaínas son un grupo de pigmentos vegetales hidrosolubles de distribución restringida, con coloración roja (betacianinas) o amarilla (betaxantinas). Si los grupos R o R' no aumentan la resonancia de la molécula, el compuesto es amarillo (betaxantina); cuando sí lo hacen, su tonalidad se torna rojo-violeta (betacianina). En la naturaleza se encuentran mayoritariamente en forma glucosilada; a su vez, la molécula de azúcar puede estar esterificada con los ácidos malónico, ferúlico, cafeíco, *p*-cumárico, sinápico o 3-hidroxi-3-metilglutárico.

El higo chumbo, como fuente de betacianinas, presenta ventajas técnicas y sensoriales. Mientras los extractos de remolacha muestran un intenso aroma y sabor (debido a la presencia de 3-alquil-2-metoxipirazinas y de geosmina), altas tasas de nitratos y una elevada carga microbiana, los extractos de higo chumbo son de sabor menos intenso y con mayor calidad desde el punto de vista nutricional. A esto hay que añadir la mayor diversidad genética de la chumbera, que incide positivamente en una amplia variedad de tonalidades de color.

Las producciones están en las 70 toneladas por hectárea y año para la remolacha roja, entre las 40-50 toneladas para el higo chumbo en condiciones de regadío y alrededor de 20 toneladas por hectárea en secano. Si se compara el rendimiento en pigmentos, los valores más altos para algunas variedades híbridas de remolacha llegan a 1,58 gramos de betanina por kilogramo de peso fresco, mientras que en los frutos de *Opuntia ficus-indica* se pueden alcanzar 1,15 g/kg, evaluadas conjuntamente piel y pulpa. Cabe añadir que estos valores son para higos que no proceden de plantas con una selección varietal sistemática que discrimine positivamente los cultivares de coloración más intensa.

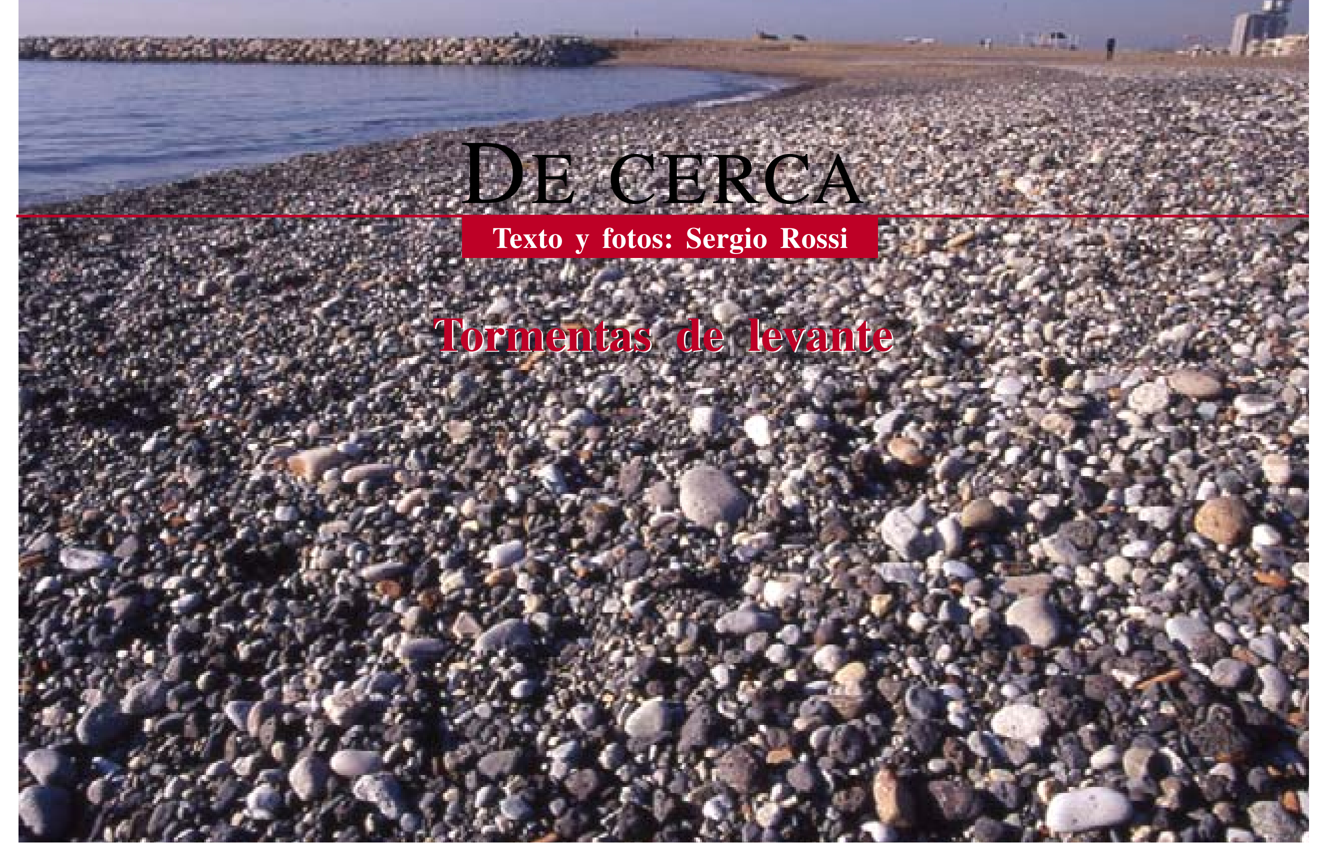
Estos datos revelan el valor añadido que puede presentar el cultivo del higo chumbo para uso como fuente de colorantes naturales, sobre todo en regiones de clima árido como las del sur-sudeste de España. El interés de estas investigaciones queda avalado por la reciente concesión de un proyecto de investigación por la Dirección General de Enseñanza Superior del Ministerio de Ciencia y Tecnología sobre "Valoración de las propiedades colorantes y antioxidantes de frutos de *Opuntia ficus-indica*. Viabilidad de empleo como fuente de colorantes naturales" a nuestro grupo de investigación. En él se optimiza el proceso de extracción de pigmentos, su composición, estabilidad y capacidad colorante.

JOSÉ ANTONIO FERNÁNDEZ LÓPEZ, JOSÉ M. OBÓN, ROSARIO CASTELLAR, MERCEDES ALACID y JOSÉ ANTONIO CASCALES
E.T.S. de Ingeniería Agronómica
Universidad Politécnica de Cartagena

DE CERCA

Texto y fotos: Sergio Rossi

Tormentas de levante



1. Las playas pueden ser las más afectadas por las tormentas de levante. El fuerte embate de las olas las erosiona y despoja de su fracción más fina de arena

2. La cantidad excesiva de materia refractaria en suspensión puede provocar el colapso de los organismos fotosintetizadores. De ello se resentirá la cadena trófica entera, que depende de los productores primarios

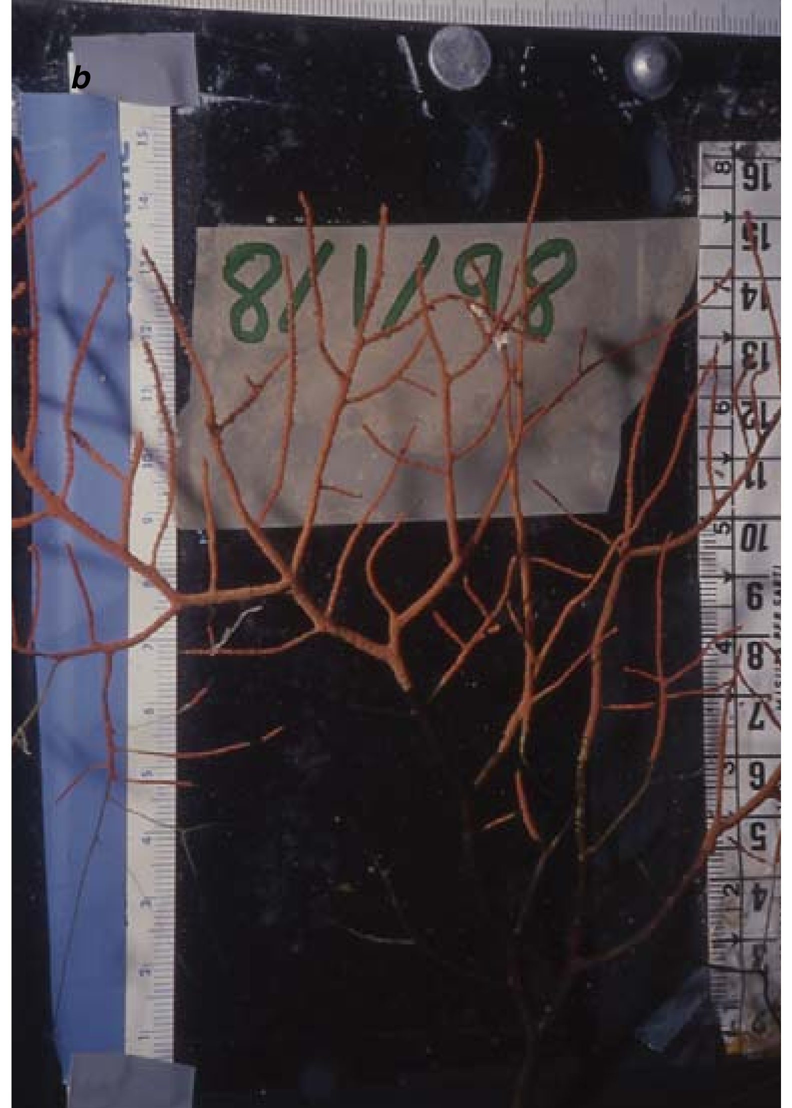
Las perturbaciones físicas son un fenómeno al que la naturaleza viva está acostumbrada. Tras un incendio forestal, el bosque inicia su regeneración. Labrando el fondo, los icebergs destruyen la estructura de la biota submarina que se reinstaura tras un proceso de sucesión.

En el Mediterráneo, los vientos de levante constituyen una de las perturbaciones naturales que operan cambios en las comunidades marinas. Las bajas presiones portan lluvias torrenciales y fuertes oleajes, debido a la entrada de aire frío que provoca una fuerte evaporación del agua del mar, todavía caliente. La arena que se va acumulando día a día en la playa puede verse desplazada en 48 horas por el violento oleaje que erosiona su estructura.

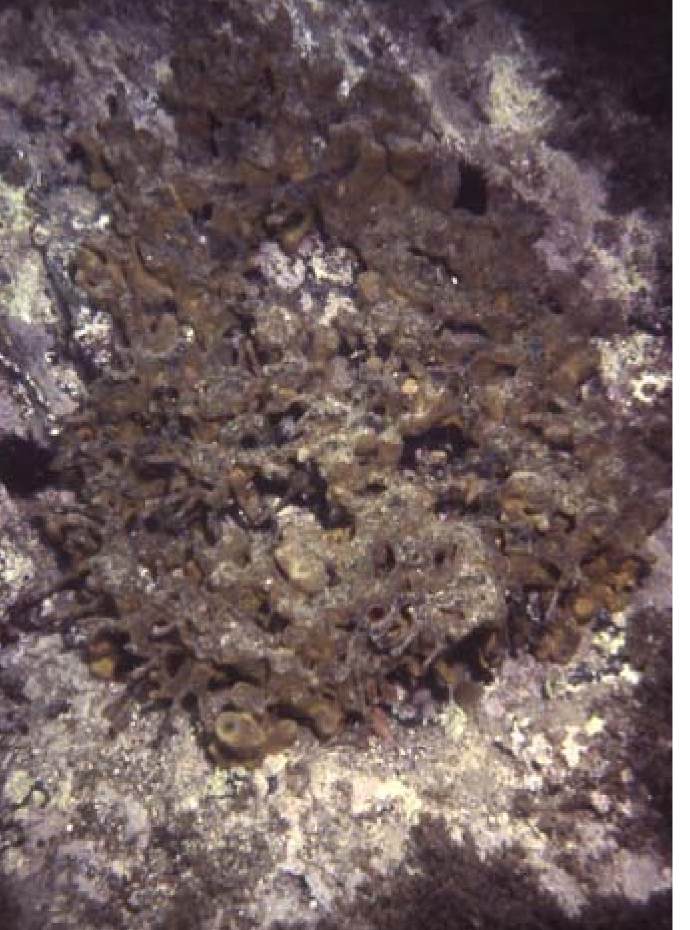
Para el observador común, el efecto manifiesto es esa erosión del litoral. Pero hay más. Si se produce una tormenta intensa, la repercusión alcanza a los organismos del fondo. Las tormentas violentas sobre el Mediterráneo remueven piedras de hasta un metro y medio de diámetro a 15 metros de profundidad y pueden desplazar grandes cantidades de arena que entierran o abrasan y necrotizan a los organismos sésiles. Añádanse a ello el exceso de resuspensión y la entrada de tierra que acarrean hasta allí los ríos; ello implica que la calidad (que no la cantidad) del alimento potencial para los organismos baje en picado, pudiendo provocar situaciones de inanición temporal.

Las comunidades marinas sufren periódicamente estas “catástrofes” naturales. Según su violencia, afectarán más o menos a los organismos (especialmente a los del fondo) que a veces se recuperan o bien dejan “espacio limpio” para nuevas generaciones. El problema puede plantearse cuando estas tormentas se hacen más frecuentes de lo que el sistema es capaz de soportar, no dando opción a la reestructuración de las comunidades.





3. Esta gorgonia (Leptogorgia sarmentosa) *ha sufrido un proceso de abrasión en su base. Obsérvese la misma colonia antes de una fuerte tormenta de otoño* (a) *y meses después* (b). *(La tormenta se produjo el 29 de octubre de 1997)*



4. Verongia aerophoba *(esponja) completamente necrotizada por el exceso de sedimento que ha cegado su sistema de filtración*



5. A veces, los drásticos movimientos de arena sepultan los organismos, como esta gorgonia naranja* (Leptogorgia sarmentosa) *de la que pueden verse tan sólo los ápices



Del miedo y del terrorismo

La destrucción física causada por los ataques del 11 de septiembre tuvo repercusiones psicológicas dañinas. La protección de la salud mental pública debe ser un componente de la defensa contra el terror

Ezra S. Susser, Daniel B. Herman y Barbara Aaron



FOTOGRAFIA DE ANTONIN KRATOCHVIL *VII*

El 11 de septiembre de 2001 los Estados Unidos sufrieron los peores ataques terroristas de su historia. A la destrucción de las torres gemelas del World Trade Center siguió pronto el bioterrorismo de unas cartas impregnadas de carbunco que mataron a cinco personas y obligaron a cerrar el Capitolio. La respuesta norteamericana fue rápida: una guerra en Afganistán y mayor asignación presupuestaria para la defensa militar. Otra reacción consistió en un oportuno aumento de los fondos destinados a apuntalar la infraestructura de la sanidad pública, cuya financiación venía siendo crónicamente deficitaria.

Muchos de estos gastos se orientarán a dar nuevo vigor a la epidemiología de las enfermedades infecciosas; el esfuerzo nos hará más capaces de detectar nuevos agentes patógenos y de controlar los brotes de morbos infecciosos. El estar bien preparados no sólo defiende a la población contra los ataques biológicos, sino que favorece una mejor reacción sanitaria ante los brotes naturales, como el del VIH y el del virus del Nilo Occidental. Pero otra importante respuesta al terrorismo es la de atender a un vital componente médico de la defensa del país: la salud mental pública.

"La finalidad de estas armas es sembrar la destrucción por medios psicológicos... introduciendo temor, confusión e inseguridad en la vida diaria", escribieron Simon Wessely, de la facultad de Medicina de Londres, y sus colaboradores en un artículo del *British Medical Journal* sobre armamento químico y biológico. Debe de ser la misma lógica también la de los ataques físicos. En los cálculos de los terroristas, que se produzcan víctimas no es tan importante como el que se expanda la noticia del suceso y éste genere miedo y angustia en la población. Una respuesta apropiada requiere, por tanto, un decidido esfuerzo que ayude a la gente a resistir esos ataques en el plano psíquico. Hemos de defender lo intangible.

El World Trade Center, símbolo de la ciudad de Nueva York y de la nación entera, ilustra muy bien esto. La destrucción de los monumentales edificios a la vista de millones de personas —las torres ardiendo podían verse a más de 30 kilómetros de distancia y más millones asistieron a su hundimiento por televisión, así como al ataque contra otro poderoso símbolo, el Pentágono— estuvo sin duda planeada para lograr el máximo efecto psicológico. Aquella devastación generó inmediatamente una profunda y muy difundida sensación de vulnerabilidad. La sorpresa fue un elemento adicional que intensificó el choque psicológico.

El perpetrador de los ataques con carbunco eligió también cuidadosamente sus blancos para conseguir la máxima influencia psicológica: envió las cartas contaminadas a periódicos, revistas, emisoras de televisión y destacados miembros del Congreso. La epidemia de confusión y angustia, aún por cuantificar, agarrotó probablemente a millones de personas que se preguntaban: "¿Me matará abrir el correo?". El sistema sanitario público no dio abasto a la demanda de antibióticos, pruebas nasales y análisis de miles de muestras de polvos procedentes de todos los rincones del país. Y sin embargo es probable que la inmensa mayoría de las personas que experimentaron aquella ansiedad no corrieran un riesgo apreciable de exposición al car-



1. LAS FOTOGRAFIAS DE PERSONAS DESAPARECIDAS en el World Trade Center abundaron en las calles de Manhattan durante los días que siguieron al de los ataques. Recordaban en cada instante la pérdida y la vulnerabilidad.

bunco. En toda la nación hubo sólo 22 casos confirmados, con cinco desafortunadas víctimas mortales. En los EE.UU. los accidentes de tráfico matan cada día a 115 personas, pero lo ocurrido con el carbunco infligió más quebranto social y daño psicológico que las tragedias del tráfico.

Estos ejemplos evidencian que proteger la salud mental debe ser uno de los elementos centrales de toda defensa contra el terror. El primer paso en la formulación de una estrategia exhaustiva es entender perfectamente el problema. Con tal fin, hemos tenido en cuenta las primeras evaluaciones de las consecuencias psicológicas de los ataques del 11 de septiembre, así como otros estudios sobre anteriores casos de terrorismo y desastres naturales que traumatizaron a amplios sectores de una población.

Evaluación del trauma

En una "Evaluación de las necesidades", cuya redacción encargó el estado de Nueva York a Chip J. Felton, de la neoyorquina Oficina estatal de Salud Mental, y a dos de nosotros (Herman y Susser), tratamos de estimar las secuelas psicológicas inmediatas de los ataques. Nuestro equipo incluía también a colegas del Departamento Neoyorquino de Salud Mental, del Instituto Psiquiátrico del estado de Nueva York, del Instituto de Investigación Psiquiátrica Nathan S. Kline y de la Academia de Medicina de Nueva York. Debe señalarse que, aunque tuvimos en cuenta a quienes estuvieron directamente expuestos a los ataques, como los supervivientes de las Torres Gemelas o quienes perdieron a personas queridas, la población en que centramos nuestra atención fue la de la ciudad de Nueva York en general.

Los autores

EZRA S. SUSSER, DANIEL B. HERMAN y BARBARA AARON trabajan en la Escuela Mailman de Sanidad, perteneciente a la Universidad de Columbia. Allí dirige Susser el departamento de epidemiología; es también director del de epidemiología de los trastornos cerebrales en el Instituto Psiquiátrico del estado de Nueva York. Ha reunido a expertos en desastres de Estados Unidos para estudiar la atención psicológica que debía prestarse a la población más afectada por el ataque al World Trade Center. Herman es el principal autor de la "Evaluación de las necesidades en salud mental" que ha de afrontar el Estado de Nueva York después del 11 de septiembre e investigador principal de una serie de estudios que se están realizando bajo los auspicios de Susser y de la Escuela Mailman. Aaron coordina en dicha Escuela los estudios sobre el World Trade Center y ha acopiado recursos académicos y gubernamentales a fin de atender los problemas de salud mental de la ciudad de Nueva York.

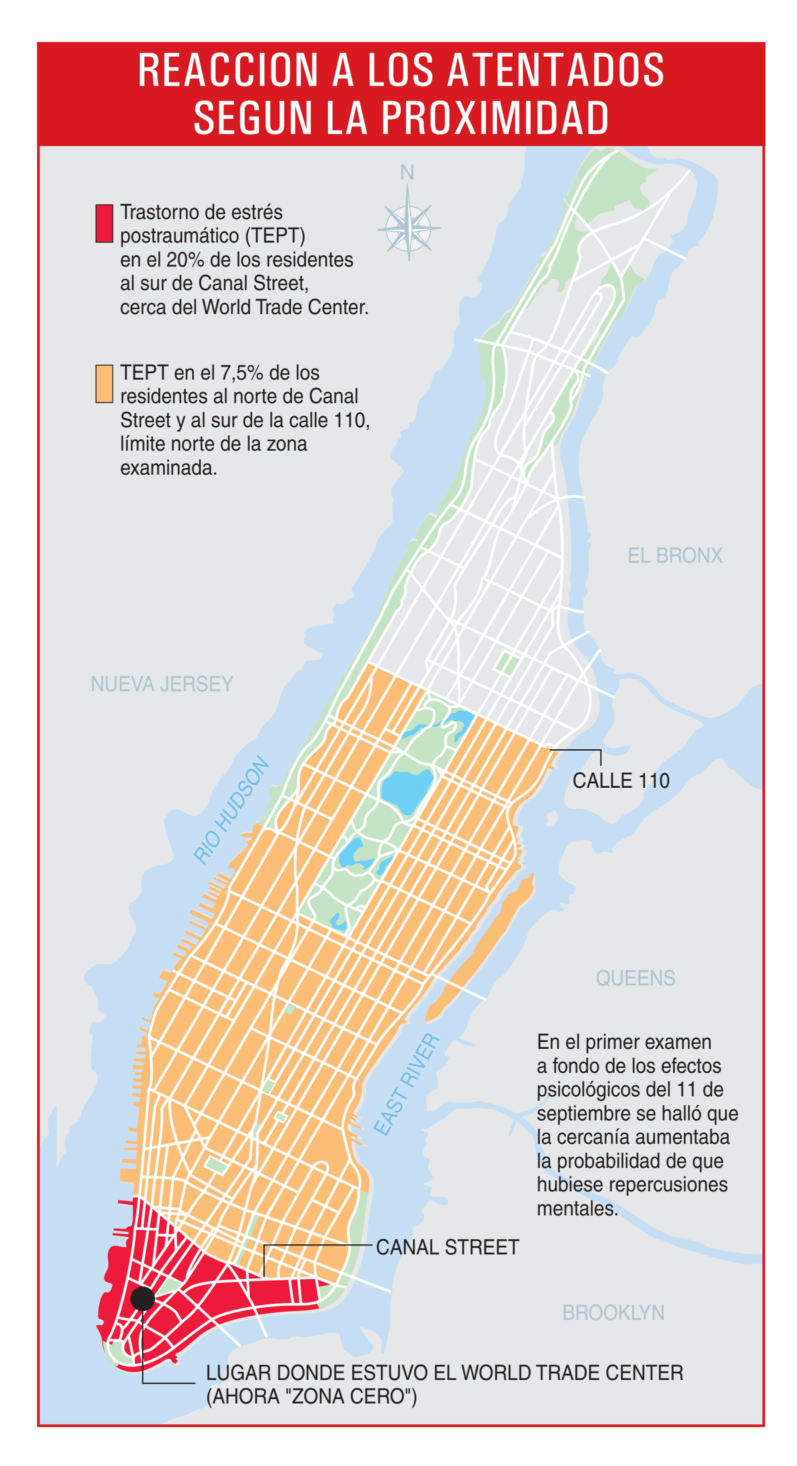
Para evaluar las necesidades, basamos nuestras estimaciones del trauma psicológico del 11 de septiembre en tres fuentes principales. La primera fue la bibliografía disponible sobre la investigación epidemiológica de desastres, incluida la obra de Fran H. Norris, de la Universidad estatal de Georgia. Norris publicó en marzo un análisis de más de 200 artículos, aparecidos entre 1981 y 2001, concernientes a las consecuencias psicológicas de 160 desastres, unos naturales y otros provocados, que afectaron a 60.000 personas de distintas partes del mundo. La segunda fuente consistía en las investigaciones sobre quienes vivían en la zona próxima al edificio de Oklahoma derruido por un atentado en 1995. La tercera comprendía dos estudios, hechos rápidamente en la ciudad de Nueva York, de los efectos psicológicos a corto plazo de los ataques a las torres. Un estudio realizado por el Departamento de Sanidad neoyorquino en colaboración con los Centros para el Control y la Prevención Sanitarios examinó a unos 400 residentes de partes muy próximas al World Trade Center; tuvimos también acceso, antes de su publicación, a un estudio de quienes residían en Manhattan más abajo de la calle 110, que se halla unos diez kilómetros al norte del World Trade Center. Este estudio, publicado el pasado marzo en el *New England Journal of Medicine*, fue dirigido por Sandro Galea, del Centro para Estudios de Epidemiología Urbana de la Academia de Medicina de Nueva York (que está completando su doctorado en nuestro Departamento de Epidemiología de la Universidad de Columbia).

El estudio de Galea analizaba las conversaciones telefónicas mantenidas entre el 16 de octubre y el 15 de noviembre con 1008 residentes en Manhattan; se les preguntó sobre su exposición a los sucesos del 11 de septiembre y los síntomas psicológicos que hubiesen padecido a partir de aquella fecha. Galea y sus colaboradores hallaron que "un 7,5 % informó de síntomas compatibles con un diagnóstico de TEPT (trastorno de estrés postraumático) actual relacionado con los ataques a las torres, y un 9,7 % informó de síntomas compatibles con una depresión actual". Estos porcentajes indicarían que había 67.000 habitantes de Manhattan con TEPT y 87.000 con depresión. La proximidad intensificó la reacción a los ataques: la proporción de TEPT en los que vivían cerca del World Trade Center saltaba al 20 %.

Claro está que antes del 11 de septiembre algo de TEPT y de depresión habría. El estudio de Galea logró, sin embargo, distinguir el TEPT ligado a los ataques y reveló que en la población estudiada casi se triplicó la incidencia del trastorno durante las semanas que siguieron a la caída de las torres.

(Otro indicio de que el estrés aumentó después del 11 de septiembre fue la tendencia a automedicarse. Un estudio publicado en junio por los Institutos Nacionales de la Salud sobre el abuso de drogas hizo ver que, durante las semanas subsiguientes a los ataques, se incrementó el consumo de cigarrillos, alcohol y marihuana.)

Estos datos concuerdan con los relativos al peor ataque terrorista sufrido anteriormente en EE.UU., cuando



CLEO VILETT; FUENTE: SANDRO GALEA EN *NEW ENGLAND JOURNAL OF MEDICINE*, VOL. 346, N.º 13; 28 DE MARZO, 2002

una bomba derribó el edificio federal Alfred P. Murrah en la ciudad de Oklahoma. Ginny Sprang, de la Universidad de Kentucky, determinó que el 7,8 % de 145 ciudadanos que no residían cerca de aquel edificio padecieron un TEPT. Carol S. North, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington, y sus compañeros hallaron el TEPT en el 34 % de 182 supervivientes que habían estado dentro del edificio o cerca de él.

Teniendo presentes los primeros informes de la ciudad de Nueva York, la bibliografía sobre la ciudad de Oklahoma y la disponible en general sobre supervivientes de desastres, nos dispusimos a evaluar la reacción psicológica a los ataques para componer el informe sobre las necesidades del estado de Nueva York. Este documento contiene estimaciones concretas para cada uno de los grupos más afectados, como el de las víctimas supervivientes y el de las familias de los que perecieron, y también de quienes trabajaron en el rescate, los habitantes de Manhattan, otros residentes de la ciudad, los habitantes de las afueras y la restante población del estado. Al final, aun con los cálculos más moderados conforme a los datos disponibles, llegamos a la conclusión de que un mínimo de unos 422.000 neoyorquinos sufrieron TEPT a consecuencia de los ataques del 11 de septiembre.

El proceso de la evaluación de las necesidades del estado dio también cabida a un estudio, realizado aparte para la Junta de Educación de la ciudad de Nueva York, en el que se examinó a escolares del 4º al 12º grados. Christian Hoven, de la Escuela Mailman de Sanidad Pública de la Universidad de Columbia, planeó este trabajo, en el cual se trató de averiguar cómo reaccionaron 8266 escolares a los ataques contra la ciudad. Según los datos, publicados a principios de mayo, el 10,5 % de los 710.000 alumnos de las escuelas públicas de la ciudad sufrieron TEPT después del 11 de septiembre.

El estudio de Hoven encontró también grandes frecuencias de otros trastornos, tales como la agorafobia o temor a los espacios abiertos. (El estudio de Galea informaba concretamente sobre el TEPT y la depresión clínica, y no sobre otras alteraciones psicológicas tales como la ansiedad y la depresión subclínica.) La estimación, que en nuestro informe de necesidades hacemos, de 422.000 casos de TEPT en todo el estado es, pues, un cálculo mínimo del trauma psicológico. Los incontables millones de personas que a través de los medios de comunicación vieron los ataques sufrieron también, sin duda, una conmoción. Y además es de suponer que los efectos del terrorismo en quienes ya padecían trastornos psíquicos tuvieron que ser especialmente graves.

Refuerzo de las defensas

Aclarada ya la magnitud del problema, hay que reconocer que la protección de la salud mental pública debe ser un elemento central de toda eficaz defensa contra el terrorismo. Sin embargo, la mayoría de los encargados de dirigir la sanidad pública no abogan con firmeza por que se incluya en la respuesta a la amenaza terrorista la salud mental. En las facultades de medicina, en los sistemas de seguros sanitarios, en la legislación sobre discapacidades y en otras esferas afines se ha descuidado también, en general, la salud mental pública. Los Centros de Control y Prevención de las Enfermedades, por ejemplo, le han prestado siempre escasa atención a pesar de que, según datos de la Organización Mundial de la Salud, la depresión es la cuarta causa de enfermedad e invalidez en el mundo. Y el mismo organismo calcula que en el año 2020 la depresión será, mundialmente, la segunda causa de muertes prematuras y discapacidades.



NIKKI WEAVERS

2. LOS DAÑOS A LA SALUD y las lesiones físicas fueron secuelas evidentes de los ataques en Manhattan. Estudios posteriores revelaron lo mucho que sufrieron también los neoyorquinos de depresión, trastorno de estrés postraumático y otras perturbaciones del psiquismo directamente relacionadas con la destrucción de las Torres Gemelas.

Por otro lado, el 21 de mayo último aparecieron dos esperanzadores signos de que empieza a reconocerse que la enfermedad mental atañe a la sanidad pública. El primero fue la recomendación del Grupo de Trabajo sobre los Servicios Preventivos de EE.UU., auspiciado por la Agencia para la Investigación de la Atención Sanitaria del Departamento de Sanidad y Servicios Humanos, de que los médicos de asistencia primaria usen un sencillo cuestionario para cerciorarse de si los pacientes sufren depresión. El segundo signo fue que el Organismo Federal para la Gestión de Situaciones de Emergencia anunciase que se destinarán más de 130 millones de euros a seguir financiando el Proyecto Libertad, un programa administrado por la Oficina de Salud Mental de Nueva York en el que se ofrece consulta gratuita —aunque no tratamiento— a los más afectados por el 11 de septiembre.

¿Qué podrá, pues, hacerse para limitar la propagación del miedo, la confusión y la desmoralización conducentes al TEPT, a la depresión y a otros trastornos psíquicos, teniendo sobre todo en cuenta lo inadecuado que es todavía el sistema público de salud mental? Aparte de la bibliografía específica ya citada, es más bien escasa la investigación de los efectos psicológicos del terrorismo, y aún hay menos documentación sobre cómo proteger de esos efectos a la gente. Debería, por tanto, tener prioridad federal la financiación de unos estudios que documentasen plenamente las consecuencias del 11 de septiembre en la salud mental e ideasen y probasen estrategias con las que minimizarlas.

Pero hasta que esos estudios puedan realizarse, lo limitado de los datos básicos no deberá recortar nuestras actuaciones, que pueden basarse en suposiciones razonables relativas al interés público y a cómo servirle mejor. Para la evaluación de las necesidades ideamos unas líneas directrices orientadas a proteger la salud mental durante las primeras semanas subsiguientes a un desastre. Un aspecto clave es el de la disponibilidad de personal experto en salud mental que pueda ser desplegado en una crisis. En esta línea es importante la iniciativa del Consorcio de la Ciudad de Nueva York para el Tratamiento Eficaz del Trauma. Un grupo de expertos en las técnicas de tratamiento del TEPT actual, nacionalmente reconocidos, está formando a 60 facultativos procedentes de numerosos centros de salud mental de la ciudad, que a su vez instruirán a otros que ejercerán privada o comunitariamente, o en programas asistenciales laborales. La preparación insiste en que es necesario llegar a los psicólogos de los colegios, a quienes proporcionan asistencia sanitaria primaria y a los maestros de educación especial.

Así como en lo militar se cuenta con una amplia fuerza de reserva que puede ser llamada a actuar durante una crisis, proponemos que se cree un cuerpo de reserva de atención mental del que formen parte profesionales de la salud mental, jubilados o que traba-



3. ENTRE QUIENES SE CONGREGABAN en octubre de 2001 en la "zona cero" de Manhattan había también niños pequeños. Según un estudio, el trastorno de estrés postraumático afectó a más de 70.000 escolares en Nueva York.

jen a tiempo parcial, que quieran contribuir con su tiempo y pericia en una situación de emergencia. Los miembros de este cuerpo de reserva diagnosticarían a los individuos con casos clínicos de trastornos mentales y les ofrecerían el tratamiento apropiado: terapia de la cognición y el comportamiento, farmacoterapia, terapia familiar u otras de las varias técnicas que se ha demostrado son eficaces. Podrían también tomar parte en programas que difundan información y extiendan la asistencia entre la población. La mayoría de las personas no requerirían asistencia profesional, pero les serviría de ayuda saber que su temor y tristeza fueron reacciones normales a un evento devastador.

Marcelle Layton, figura destacada en la preparación contra el bioterrorismo dentro del Departamento de Sanidad de la ciudad de Nueva York, indica que puede fomentarse la cohesión social instruyendo a la comunidad acerca de las amenazas potenciales e informando al público en cuanto a la naturaleza de la respuesta oficial. También puede influir muy positivamente que se imparta ánimo al pueblo. Los líderes políticos pueden desempeñar una función importante en la preservación de la salud mental del público, porque el sentido comunitario y la cohesión social fortalecen a éste contra la aspiración fundamental del terror: infligir un trauma psicológico. (De hecho, cada vez abunda más la bibliografía epidemiológica que sugiere que la cohesión social, o "capital social", confiere una protección *general* contra la morbilidad y la mortalidad.)

Un factor básico de cohesión social y moral, probablemente con profundas raíces en la psicología evolutiva, es el liderazgo de un solo personaje, con autoridad, que inspire confianza. Uno de los más notorios ejemplos históricos del poder de tal vínculo social se dio en 1940 con la Batalla de Inglaterra, en la Segunda Guerra Mundial. Los bombardeos nazis tenían por finalidad, más que matar a algunos ingleses, desmoralizarlos a todos. Pero Winston Churchill, el Primer Ministro británico, a la vez que intentaba reforzar una débil defensa aérea, se impuso la tarea de apuntalar la determinación de su pueblo de resistir las consecuencias psicológicas de los bombardeos. Sus alocuciones radiofónicas, que fomentaban la sensación de un propósito compartido, fueron auténticas intervenciones en la salud mental pública.

De manera parecida, en la ciudad de Nueva York, durante las semanas posteriores a los ataques, el alcalde Rudolph Giuliani hizo un gran servicio a la conmocionada población al encargarse en persona, de manera muy ostensible, de mantener a la ciudadanía constantemente informada y de animarla infundién-



dole una sensación de control y optimismo. También Israel, atacada en 1991 con misiles Scud durante la Guerra del Golfo, se atuvo al patrón de que una sola voz familiar informase al público con mensajes claros, firmes y coherentes: en medio de los ataques, la mayoría de las emisoras de radio transmitían una misma programación, en la que un solo responsable público informaba a los oyentes.

Sin embargo, como no se las formule cuidadosamente, las afirmaciones de los cargos públicos y los representantes de los medios de comunicación pueden producir temor en vez de aliviarlo. Los portavoces deben ejercer con elocuencia y conocimiento sus cruciales funciones, y los medios deben proporcionar información completa y exacta de un modo que no provoque inquietudes y angustias. Por ejemplo, un análisis exhaustivo de una nueva amenaza terrorista puede ser beneficioso; no lo será, en cambio, la aparición durante sólo 10 segundos de un anuncio en el que se diga: "¡Nueva amenaza terrorista! Más información a las once". Y lo más probable es que sean contraproducentes los mensajes mixtos, en los que funcionarios del gobierno nos alarman sin darnos detalles, exhortándonos a "estar muy alerta", para explicarnos a continuación que podemos movernos normalmente e "ir de compras". (Las detenciones y los interrogatorios secretos de personas oriundas de Oriente Medio que está practicando el Departamento de Justicia de los EE.UU. rompen también la cohesión social.)

Es muy probable que una mejor manera de lograr que aumente la cohesión social sea pedirle a la población que haga algún sacrificio y arrostre dificultades, no que consuma ostentosamente. Diversos estudios sobre las novatadas en las fraternidades de estudiantes y los campamentos militares ponen de manifiesto que el espíritu corporativo que se ve en esas agrupaciones se debe en buena medida a esas pruebas por las que todos han pasado [*véase* "Psicología de la persuasión", por Robert B. Cialdini; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2001]. Las recogidas de objetos metálicos, las ventas de bonos de guerra y otras contribuciones de los no combatientes en la Segunda Guerra Mundial apoyaron el esfuerzo bélico y robustecieron la salud mental de la población. Y los donantes de sangre que en la tarde y noche del 11 de septiembre hicieron cola ante los hospitales, aunque su principal motivación fue la de ayudar a los otros, estaban también ayudándose a sí mismos a superar el trauma.

Al ir a entrar en prensa este artículo se publicaron unos resultados preliminares basados en nuevas investigaciones del grupo de Galea. Para este estudio se habló por teléfono, entre el 15 de enero y el 21 de febrero, con 2001 neoyorquinos. Los síntomas que dijeron tener indicaron que va disminuyendo notoriamente el número de sujetos estudiados susceptibles de que se les diagnostique TEPT. Muchos de los neoyorquinos afectados están recuperando su salud normal, gracias sin duda a la elasticidad y resistencia del psiquismo humano.

Pero también, mientras se ultimaba este artículo, el vicepresidente Dick Cheney y el Secretario de Defensa Donald Rumsfeld anunciaron que era casi seguro que fuese a haber más ataques terroristas. Incumbe, por consiguiente, al gobierno federal de la nación el establecimiento de equipos de sanidad mental y pedirles que ideen reacciones rápidas. Para llegar a la inmensa mayoría de la población, los miembros de esos equipos deberán ir, más allá de las instituciones sanitarias, a las escuelas, las organizaciones religiosas, las comunidades de vecinos, el ejército y la policía, los bomberos y la protección civil. Hemos empezado a dar pasos para proteger nuestras vidas y propiedades. Debemos proteger y defender también nuestra salud mental.

Bibliografía complementaria

PSYCHOLOGICAL IMPAIRMENT IN THE WAKE OF DISASTER: THE DISASTER-PSYCHOPATOLOGY RELATIONSHIP. Anthony V. Rubonis y Leonard Bickman en *Psychological Bulletin*, vol. 109, n.º 3, págs. 384-399; mayo de 1991.

PSYCHOLOGICAL SEQUELAE OF THE SEPTEMBER 11 TERRORIST ATTACKS IN NEW YORK CITY. Sandro Galea *et al.* en *New England Journal of Medicine*, vol. 346, n.º 13, págs. 982-987; 28 de marzo de 2002.

THE RANGE, MAGNITUDE, AND DURATION OF THE EFFECTS OF NATURAL DISSASTERS: A REVIEW OF THE EMPIRICAL LITERATURE. Fran H. Norris *et al.*

Evolución y adaptación de los virus de ARN

Los virus cuyo genoma está constituido por ARN forman el grupo principal de los patógenos subcelulares. Con una singular capacidad para generar variabilidad genética, se adaptan a nuevos hospedadores y resisten a los fármacos

Santiago F. Elena

Cuando se habla de evolución, pensamos de inmediato en las plantas o en los animales. Raramente en los microorganismos. Muchísimo menos en los virus. Pero éstos ofrecen una variabilidad genética amplísima que invita, como ningún otro ser, a la selección. En razón de su constitución genética distinguimos entre virus de ADN y virus de ARN. Los virus cuyo genoma es una molécula de ARN o que poseen este ácido nucleico como intermediario en su ciclo de vida (retrovirus) se caracterizan por su variabilidad genética y la enorme fluctuación del tamaño de sus poblaciones.

El tamaño de las poblaciones víricas sufre cambios bruscos con la transmisión entre hospedadores o incluso entre distintos tejidos de un mismo individuo infectado. La nueva infección puede iniciarse con muy pocas partículas víricas que se replicarán miles de millones de veces hasta alcanzar la carga vírica propia de la infección.

La variabilidad genética de los virus de ARN refleja la falta de mecanismos para la detección y corrección de los errores cometidos durante la replicación del genoma. Cabe también atribuirla a la recombinación o intercambio de segmentos en el proceso de replicación; tal ocurre, por ejemplo, con las cepas de la gripe. Las partículas que inician una infección proceden, al azar, del conjunto de genotipos que constituían la población originaria. No tienen por qué ser representativas de la constitución genética del conjunto de la población.

En biología evolutiva se habla de cuellos de botella para designar semejantes reducciones drásticas en el tamaño poblacional, debidas a fenómenos aleatorios y con inevitable pérdida de variabilidad genética. La repetición periódica de cuellos de botella puede entorpecer la capacidad de las poblaciones víricas para completar su ciclo biológico (esto es, su eficacia biológica); en casos extremos acarrea la extinción de la población vírica.

Pero se produce la situación inversa, de continuas e ininterrumpidas expansiones poblacionales, con la transmisión de cantidades ingentes de partículas víricas entre hospedadores sin que medien cuellos de botella. Ocurre, por desgracia, en las transfusiones de plasma sanguíneo contaminado. En ese caso, aumenta la eficacia biológica de las poblaciones víricas y su adaptación a nuevos entornos.

Abordaremos aquí el efecto que las mutaciones, la selección natural y el azar en forma de cuellos de botella genéticos ejercen en la adaptación y extinción de los virus de ARN.

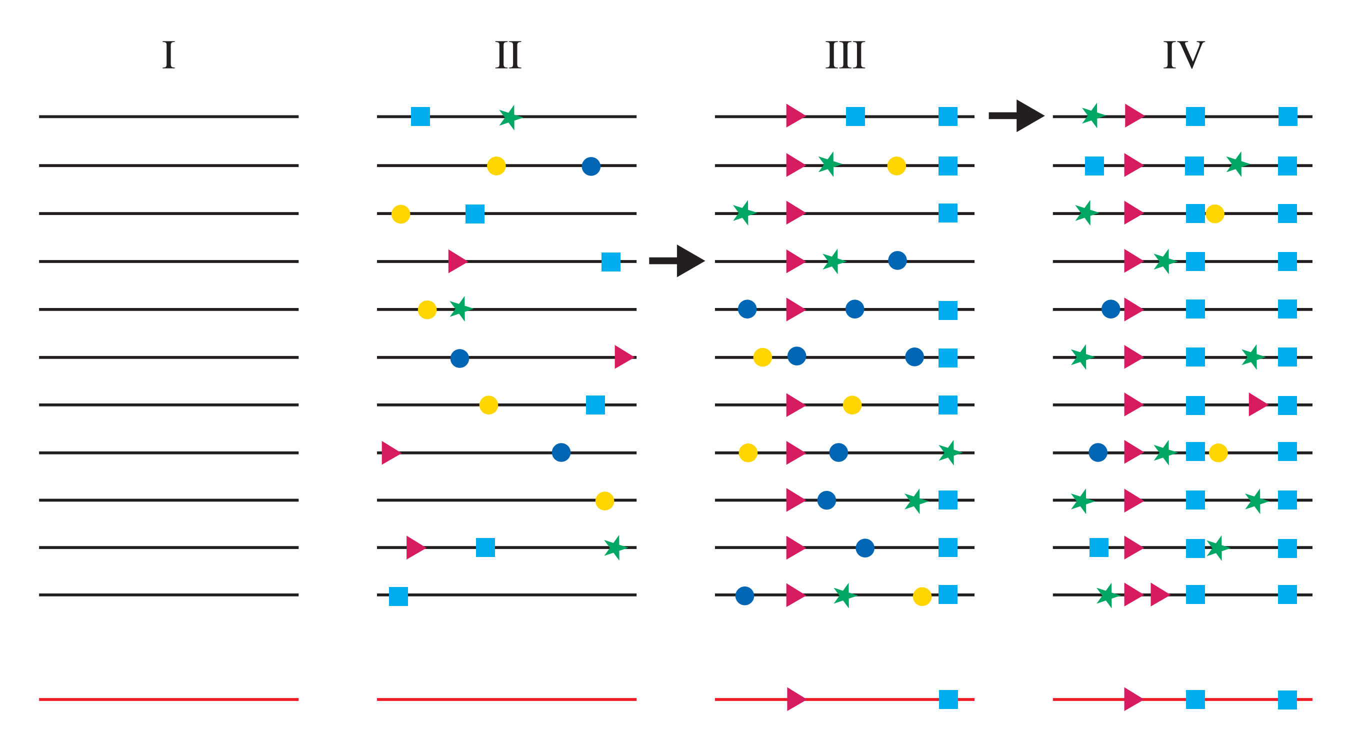
Mutaciones

En el curso de la evolución, la selección natural prima a los mejor adaptados. Para que opere la selección, se requiere que los organismos se reproduzcan, exista una base genética para los caracteres fenotípicos, difieran unos fenotipos de otros y vayan asociadas tales diferencias fenotípicas a una distinta eficacia biológica. Los virus de ARN cumplen esas cuatro condiciones.

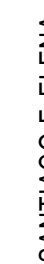
La velocidad con que se replican los genomas de los virus de ARN

El autor

SANTIAGO F. ELENA, investigador del Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva de la Universidad de Valencia, trabaja en los factores genéticos y ecológicos que mantienen la increíble diversidad del mundo de los microorganismos.



1. EFECTO DE VARIOS CUELLOS DE BOTELLA consecutivos sobre el número de mutaciones que se acumulan en un genoma vírico. Cada línea representa el genoma de un virus; cada símbolo, una mutación distinta. La línea inferior roja simboliza el genoma promedio de la población. La población I constaría de un conjunto de secuencias de ARN idénticas, sin mutaciones. La población II responde a una situación real, con un número promedio de dos mutaciones por genoma. Debido a la aleatoriedad de la mutación, cada genoma contendrá cambios distintos. Imaginemos que ocurre un cuello de botella. Tomamos de la población II un genoma caracterizado por llevar dos mutaciones; dejamos que se replique hasta formar la población III. Todos los miembros de la población III poseerán las dos mutaciones características del individuo fundador más las nuevas que apareciesen durante su síntesis. Ahora, el genoma promedio llevará dos mutaciones: el trinquete de Müller habrá aumentado el número de mutaciones presente en la población. Si volviese a ocurrir otro cuello de botella seguido de replicación con error, generaríamos la población IV, caracterizada por un número aún mayor de mutaciones.



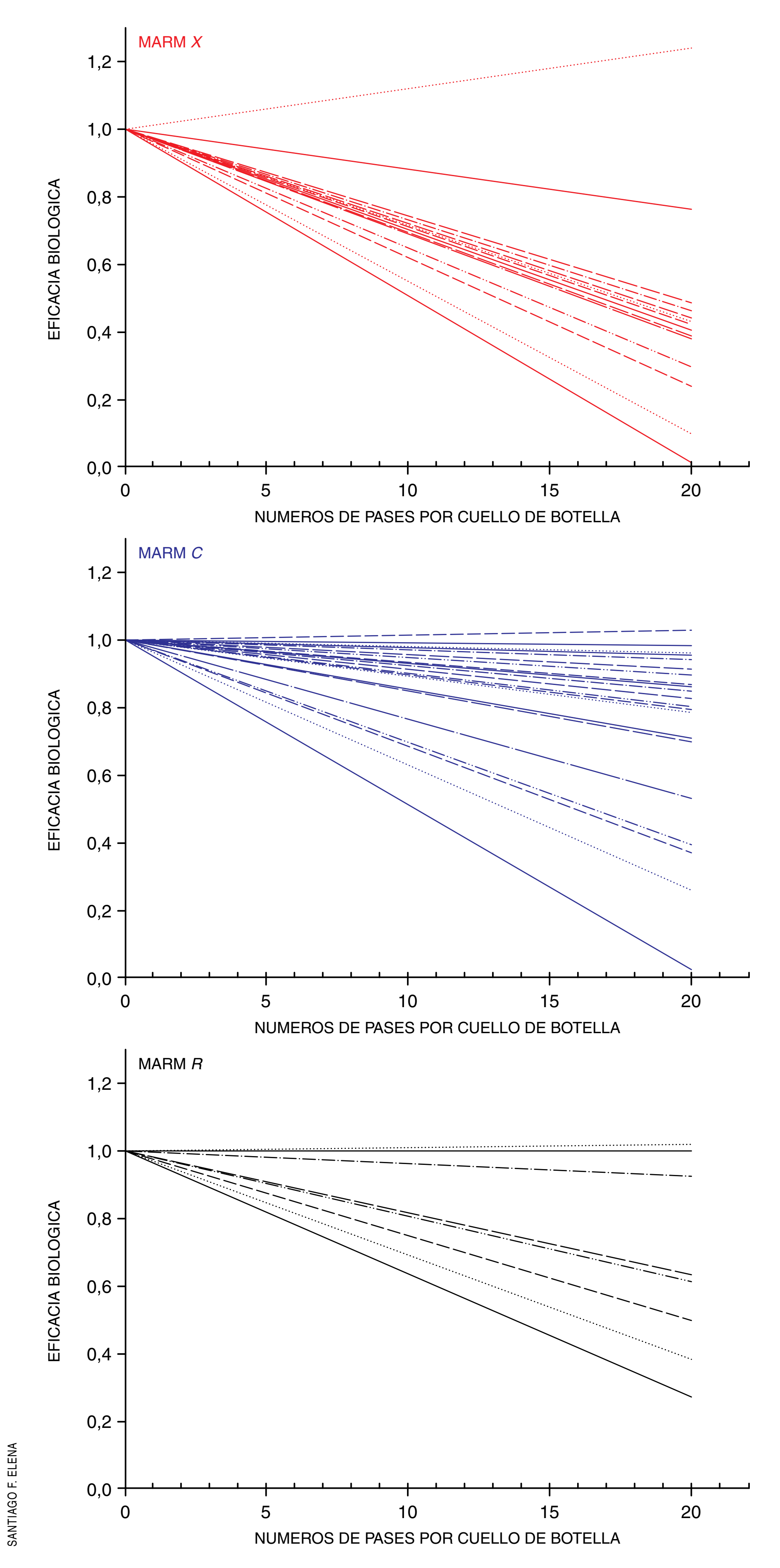
supera, en varios órdenes de magnitud, la tasa de división de las células en que se alojan. Pero poseen unos mecanismos replicativos harto deficientes, que dan pie a frecuentes mutaciones. En su mayoría, tales mutaciones afectan a la eficacia biológica de los virus.

Los virus de ARN poseen la tasa de mutación más alta de entre todos los organismos vivos. Este potencial para generar variabilidad genética explica que nos hallemos ante los parásitos más abundantes. Añádase a ello el magro éxito alcanzado en el control de las epidemias que originan. En los últimos 20 años han aparecido más de 50 nuevas enfermedades humanas ocasionadas por virus de ARN: sida, fiebres de Lassa, Mobala, del valle del Rift, Pichide o Machupo, las fiebres hemorrágicas de Ebola o Marburgo, etcétera.

No obstante, una tasa de mutación alta es un arma de doble filo. Su efecto positivo o negativo dependerá de las condiciones demográficas a las que esté sometida la población vírica. Si escasean las posibilidades para que se entable una competencia entre distintos genotipos (poblaciones pequeñas generadas por cuellos de botella), el azar producirá la fijación, en la población naciente, de mutantes con una eficacia biológica limitada. Sin embargo, la relación entre la tasa de optimización de la eficacia biológica y el tamaño de las poblaciones víricas no es lineal. A partir de cierto tamaño, la competencia entre variantes es tan intensa, que se reduce la probabilidad de fijación de una nueva variante genética.

Por mutación entenderemos aquí cualquier cambio ocurrido en el genoma. Esta definición general nos permite incluir la recombinación como un caso más de mutación. John Drake, del Instituto Nacional de Salud de EE.UU., y John Holland, de la Universidad de California en San Diego, realizaron una detallada recopilación de tasas de mutación genómica para virus de ARN y retrovirus. Encontraron que, para virus líticos, la tasa de mutación genómica estaba en el rango de las 0,8 mutaciones por genoma y replicación vistas en el poliovirus y las 6,5 del bacteriófago Qβ. La tasa de mutación genómica para retrovirus fue, en promedio, un orden de magnitud menor: 0,027 para el virus de la leucemia bovina y 0,43 para el virus del sarcoma de Rous.

De todas estas mutaciones generadas, la inmensa mayoría tendrán un efecto negativo sobre la eficacia biológica del virus; una parte considerable serán neutras, que, al no tener efecto sobre la eficacia, carecen de interés evolutivo; por último, una ínfima parte, beneficiosas, serán las responsables de la adaptación del virus a nuevas situaciones ambientales. Comenzaremos por el primer



2. EFECTO sobre la eficacia biológica de la acumulación de mutaciones deletéreas en tres genotipos distintos del virus de la estomatitis vesicular (VSV). Para cada genotipo (MARM *X*, *C* y *R*) se acometieron diversos experimentos (*las líneas de cada gráfica*) en los que se forzaba a pasar una población vírica por 20 cuellos de botella consecutivos. Al final del proceso se aislaron los virus resultantes y se midió su eficacia biológica en comparación con la mostrada por el virus ancestral (al que arbitrariamente se le asignaba un valor de uno). En su mayoría los experimentos mostraban significativas caídas en la eficacia biológica vírica, fruto de la acumulación paulatina de mutaciones deletéreas en ausencia de selección natural purificadora.

tipo, las mutaciones deletéreas.

Fijación por deriva genética

Si la tasa de mutación es notable y el tamaño de la población es pequeño o sufre cuellos de botella, escasearán los individuos cuyo genoma se encuentre libre de mutaciones. Estos individuos podrían perderse por el proceso aleatorio de deriva genética. En poblaciones asexuales, señaló Hermann Müller hace más de treinta años, se tratará de una pérdida irreversible; el número promedio de mutaciones por genoma aumentará con la desaparición de los genomas menos mutados. En su honor se llama trinquete de Müller a este proceso de acumulación de mutaciones deletéreas.

El tamaño de las poblaciones de virus de ARN manifiesta drásticas oscilaciones. Son elevadas sus tasas de mutación y, en general, no se da intercambio genético entre virus distintos. Lin Chao aportó en 1991 la primera prueba experimental de la acción del trinquete de Müller en virus de ARN. Observó que, al someter al bacteriófago $\phi 6$ a consecutivos cuellos de botella, desde varios miles de individuos a sólo uno, la eficacia de la población vírica resultante se redujo en un 22 %.

Esa misma observación la extendieron al virus de la estomatitis vesicular (VSV, un virus emparentado con el de la rabia) el grupo de

Holland en cooperación con Esteban Domingo, del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, y con nuestro grupo de la Universidad de Valencia; al virus de la fiebre aftosa (FMDV) el grupo de Domingo en colaboración con el nuestro; al virus del sida (HIV-1) el grupo de Cecilio López Galíndez, del Instituto de Salud Carlos III, y al bacteriófago MS2 nuestro grupo.

En general, los datos recogidos mostraban un patrón común de pérdidas de eficacia biológica a igualdad de condiciones demográficas. Pero la magnitud de la pérdida media y, sobre todo, la varianza entre las pérdidas observadas en distintas réplicas experimentales dependían estrechamente del virus estudiado. Las pérdidas sufridas por el VSV o el MS2 oscilaban entre la total extinción y pérdidas menores del 1 %. Las pérdidas sufridas por el FMDV fueron, en promedio, mayores; oscilaban entre la extinción y el 14 %. Sin embargo, el HIV-1 experimentaba pérdidas promedio mucho mayores (entre la completa extinción y un 89 % de pérdida), aunque con una varianza mucho menor.

En un trabajo reciente, analizamos todos los datos de acumulación de mutaciones obtenidos en los experimentos realizados con VSV. Nos proponíamos un triple objetivo: estimar el efecto deletéreo promedio asociado a una mutación (¿cómo afecta a la eficacia biológica de un virus algo tan frecuente como mutar?), determinar la tasa de aparición de mutaciones deletéreas (¿cuál es la probabilidad de que un virus mute para peor?) y averiguar la distribución de probabilidad de los efectos deletéreos (¿con qué probabilidad aparecerá una mutación de un determinado efecto sobre la eficacia biológica?)

Aunque, de acuerdo con lo esperado, la distribución de efectos deletéreos dependía del genotipo de VSV examinado, se percibía un patrón común entre los distintos genotipos. La distribución de efectos aparecía sesgada hacia mutaciones con efectos pequeños; con otras palabras, los efectos pequeños menudeaban más que los grandes. La distribución era también leptocúrtica, es decir, la mayoría de los efectos deletéreos se aproximaban a la media de la distribución o caían en los extremos, con muy pocos valores intermedios.

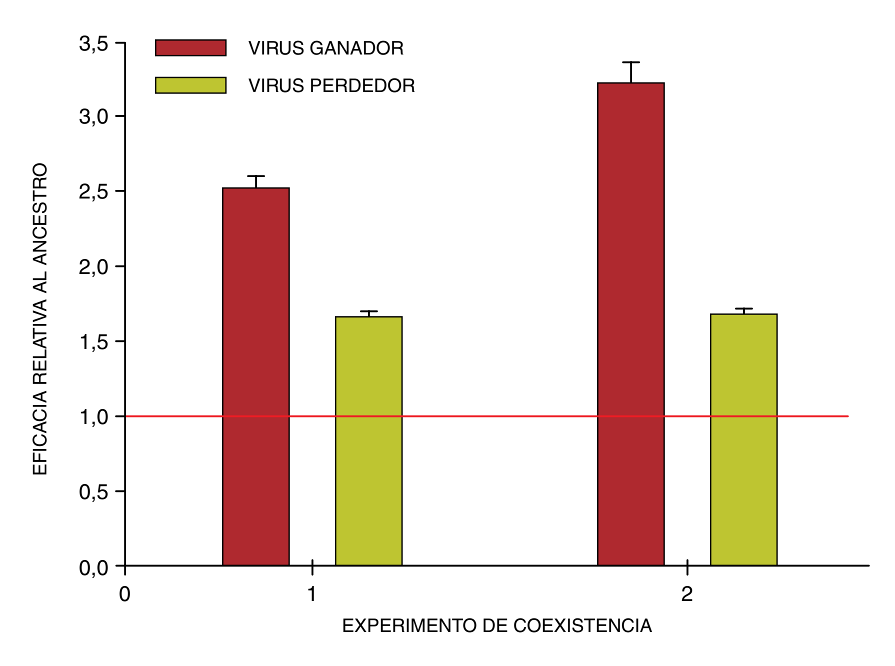
Ciframos la tasa de mutación deletérea en unas dos mutaciones por genoma y ronda de replicación, un valor que convergía con las estimaciones de tasa de mutación genómica total computadas por Drake y Holland a partir de otros métodos. Por último, calculamos que el efecto deletéreo promedio asociado a una mutación se hallaba en torno al 0,1 %.

Del estudio se infería que las enormes pérdidas de eficacia observadas debíanse a la acumulación de muchas mutaciones de efecto pequeño. ¿Qué sentido evolutivo había que atribuir a nuestro hallazgo? Desde los trabajos de Ronald Fisher, en el primer tercio del siglo XX, se sabía que el influjo que la acumulación de mutaciones ejerce sobre la supervivencia a largo plazo de una población es mucho más profundo cuanto menor sea el efecto deletéreo que las mutaciones llevan asociado.

La selección natural descarta las mutaciones que atentan contra la supervivencia del organismo (el caso extremo lo representa una mutación letal). Pero se muestra menos exitosa a la hora de eliminar las mutaciones que apenas afectan a la capacidad de un organismo para sobrevivir y reproducirse, transmitiéndolas a la siguiente generación. En nuestro caso ello significa que las mutaciones tienden a acumularse en el genoma de VSV en ausencia de selección y reproducción sexual, cuando la dinámica demográfica induce reiterados cuellos de botella.

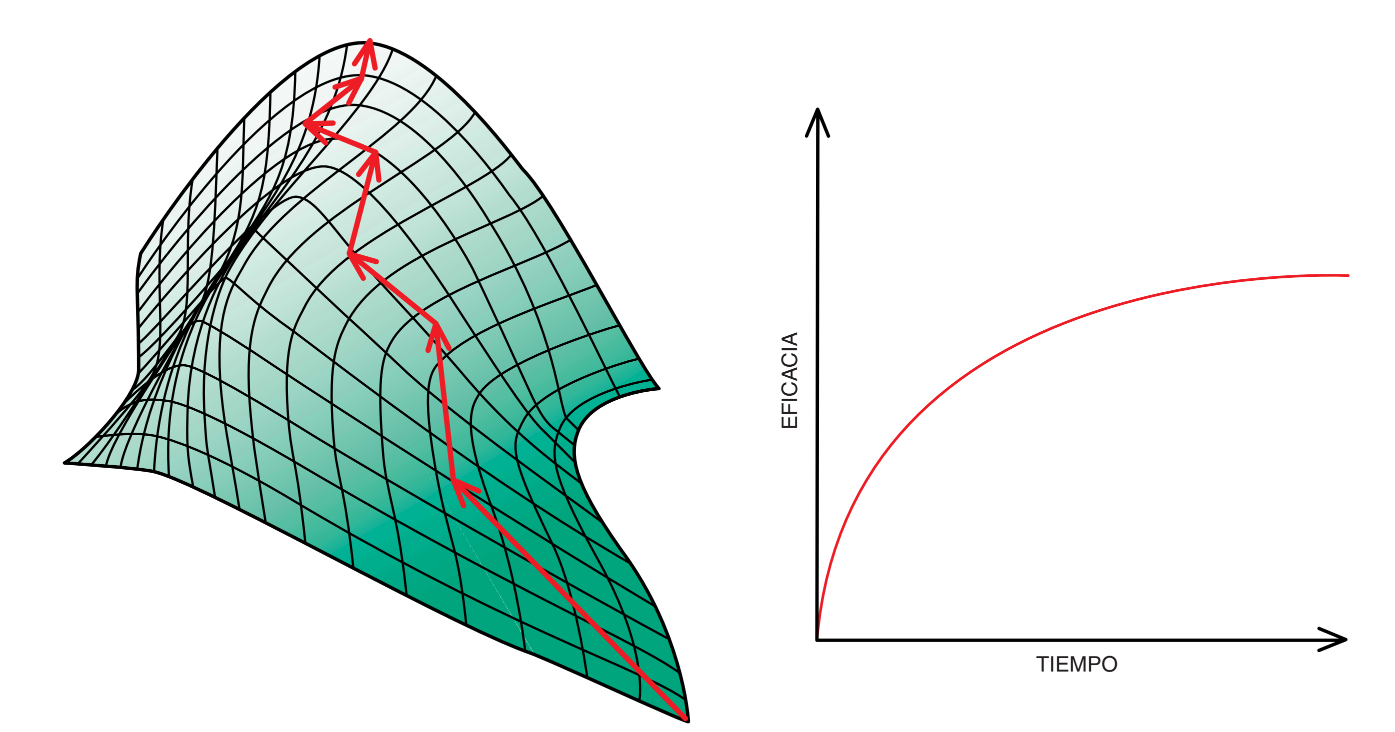
Tamaño de población y trinquete de Müller

Cualquiera que fuera la densidad de la población vírica des-

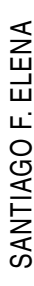


3. LA REINA ROJA en el país de los virus de ARN. Se mezclaron dos clones distintos de VSV que, inicialmente, mostraban la misma eficacia biológica (por convención, igual a uno). Se dejó que la mezcla evolucionara hasta que uno de los dos clones eliminaba al otro, lo que ocurría después de un número variable de días de coexistencia. El día anterior a la eliminación de uno de los competidores, se recuperaron el virus ganador y el perdedor; se midieron sus eficacias biológicas con respecto a sus ancestros. Ambos, el virus ganador y el perdedor, habían aumentado su eficacia con respecto a la situación ancestral (mayores que uno). Los resultados fueron similares cuando el experimento se repitió varias veces. Entre los competidores se estableció una "carrera de armamentos", lo que, en palabras de la Reina Roja de *Alicia en el país de las maravillas*, significa que "hay que correr mucho para permanecer siempre en el mismo punto".

SANTIAGO F. ELENA



4. EVOLUCION ADAPTATIVA. El paisaje adaptativo del panel de la izquierda es una representación gráfica de un proceso evolutivo en el que las colinas simbolizarían combinaciones genéticas bien adaptadas y los valles combinaciones poco aptas. Una población puede moverse, gracias a la aparición de nuevas variantes genéticas (mutaciones) a través del paisaje adaptativo. Si la selección natural actúa, haciendo que los genotipos que portan una variante beneficiosa aumenten su frecuencia en la población, entonces ésta se moverá a través del paisaje hacia un valor de máxima eficacia biológica. A medida que nos acercamos al valor óptimo, decae el efecto ejercido por las mutaciones responsables de la aproximación. En caso contrario, podría pasarse de largo el pico y empezar a bajar por el lado opuesto. Una vez se alcanza el pico, la población permanecerá en él, bien adaptada, hasta que ocurra algún cambio en la topografía del paisaje. Esta dinámica de movimientos en un paisaje hasta escalar una colina adaptativa se traduce, en términos matemáticos, en una función similar a una hipérbola (*gráfica*).



pués de sufrir un cuello de botella de tamaño uno, el efecto negativo de la deriva genética reducía la eficacia biológica. Pero, ¿había un umbral de cuello de botella que garantizara el mantenimiento de la eficacia biológica inicial?

De nuevo los grupos de Holland, Domingo y el nuestro, en cooperación, recurrieron al VSV para resolver la cuestión. Descubrimos que el tamaño mínimo de cuello de botella necesario para detener el efecto del trinquete de Müller dependía del genotipo de VSV. Si para un genotipo que inicialmente presentaba una alta eficacia biológica un tamaño de cuello de botella de cinco partículas víricas producía todavía pérdidas de eficacia, esa misma población no ejercía efecto negativo con genotipos de eficacia unidad o incluso ligeramente deletéreos.

Hubo que aumentar el tamaño del cuello de botella hasta 30 partículas víricas para detener el efecto del trinquete de Müller en genotipos de alta eficacia. Por el contrario, para un clon que mostraba de partida eficacias bajas o unitarias, resultó insuficiente incluso un cuello de botella de tamaño dos: no provocaba pérdidas de eficacia biológica.

Competencia entre variantes genéticas

Conocido el efecto de las mutaciones deletéreas, abordemos el efecto de las mutaciones beneficiosas sobre la adaptación vírica.

La adaptación es una consecuencia de la acción de la selección natural que opera siempre que existen diferencias entre genotipos. En la pugna por un recurso limitado, el genotipo más eficaz desplazará al resto, aumentando con ello la eficacia biológica promedio de la población. La competencia se da también en virus de ARN.

Cuando dos especies luchan por un mismo recurso se desencadena una "carrera de armamentos". La eficacia de cada especie mejora con respecto a sus antecesoras, pero se mantiene en la misma situación con respecto al competidor actual. A ese fenómeno de correr mucho para estar siempre en el mismo lugar, Leigh van Valen, de la Universidad de Chicago, le recordaba un pasaje de *Alicia en el país de las maravillas* y, en su honor, lo llamó "el efecto de la Reina Roja".

Dos clones víricos pueden coexistir largo tiempo sin que uno desplace al otro, si demuestran pareja eficacia; comparados, sin embargo, con sus respectivos antepasados, evidencian aumentos significativos en su eficacia. Con el tiempo, pueden aparecer mutaciones beneficiosas en ambos genotipos. Si el efecto en la eficacia biológica asociado con las mutaciones que han aparecido en cada genotipo es similar, ninguno de los genotipos mostrará una ventaja clara sobre el otro. Tras un período de coexistencia,

terminará por emerger una mutación beneficiosa de efecto importante en uno de los genotipos, pero no en el otro. Cuando esto ocurra, el primero tendrá ventaja sobre el segundo, al que desplazará de la población. Este desplazamiento es un reflejo de otro principio general de la biología evolutiva, el de exclusión competitiva.

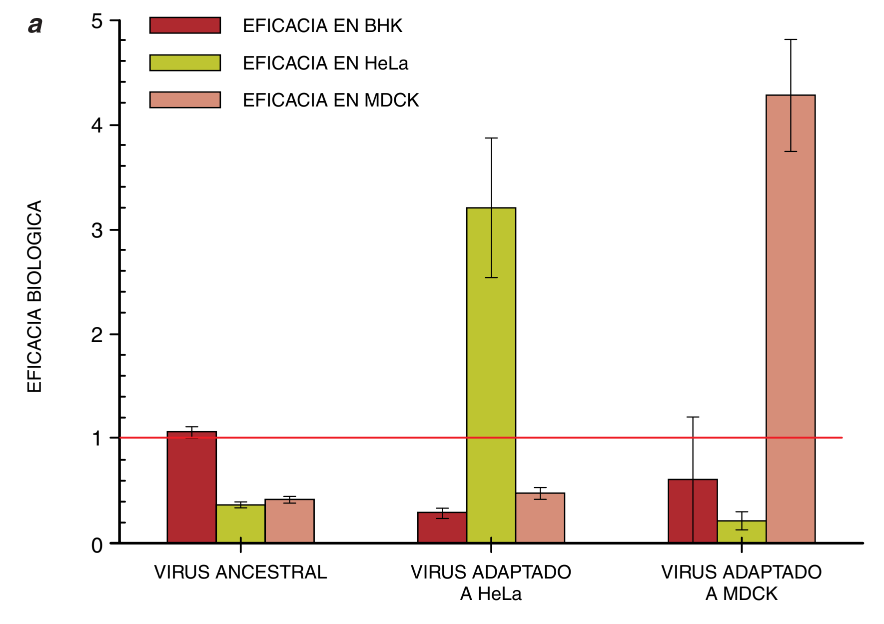
Una vez más, nuestra cooperación con los grupos de Holland y Domingo sirvió para demostrar que el principio de la Reina Roja y el de exclusión evolutiva operan en el VSV.

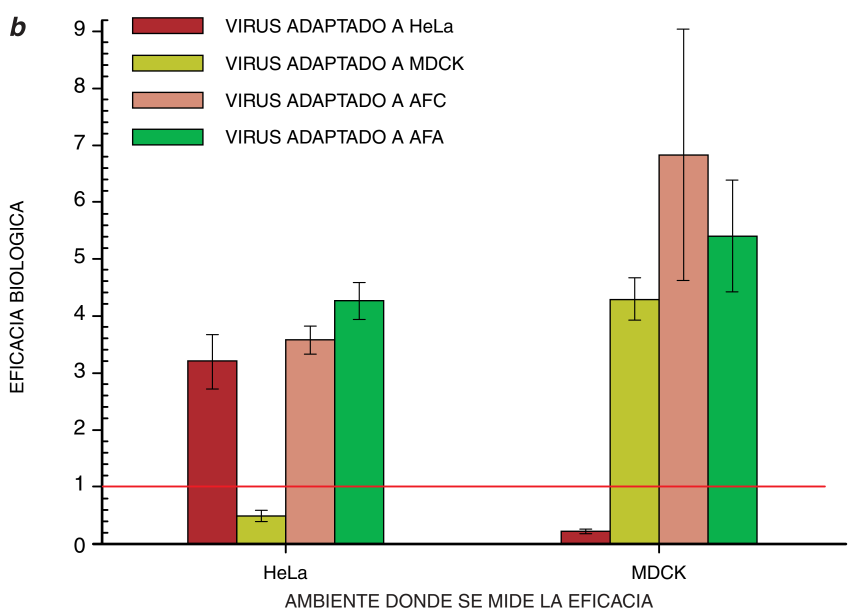
Adaptación y evolución a largo plazo

La aparición de mutaciones beneficiosas y el desplazamiento de un genotipo ancestral por otro portador de mutaciones beneficiosas dirige la evolución a largo plazo de los virus de ARN. A pesar del carácter aleatorio de las mutaciones, se ha venido observando un patrón de evolución común en distintos experimentos realizados con VSV por los grupos de Holland, Domingo y el nuestro. Este patrón se caracteriza por aumentos exponenciales de la eficacia biológica en períodos relativamente cortos de tiempo (días).

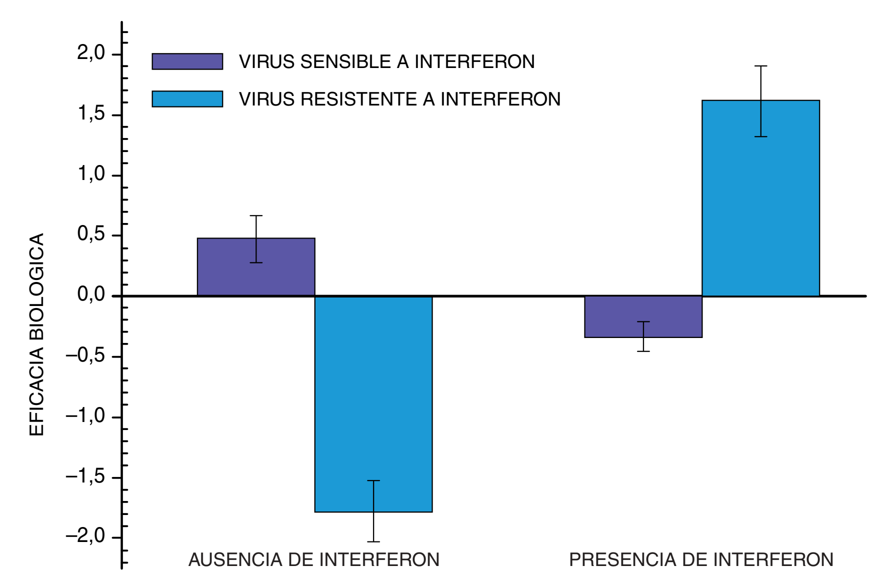
Los aumentos exponenciales no se producían de modo uniforme. Después de un período inicial de crecimiento rápido, seguía una deceleración en la tasa de adaptación para, finalmente, alcanzarse una situación de equilibrio en la que ya no progresaba la eficacia biológica; el virus se había adaptado a la nueva situación. En forma matemática, podemos describir el proceso mediante una función hiperbólica del tiempo en una escala logarítmica de eficacias biológicas. La razón de la deceleración de la velocidad de adaptación tiene que ver con la disponibilidad de mutaciones beneficiosas y depende, asimismo, de la magnitud del efecto beneficioso asociado con cada posible mutación disponible.

Al principio del proceso, cuando la población vírica se encuentra

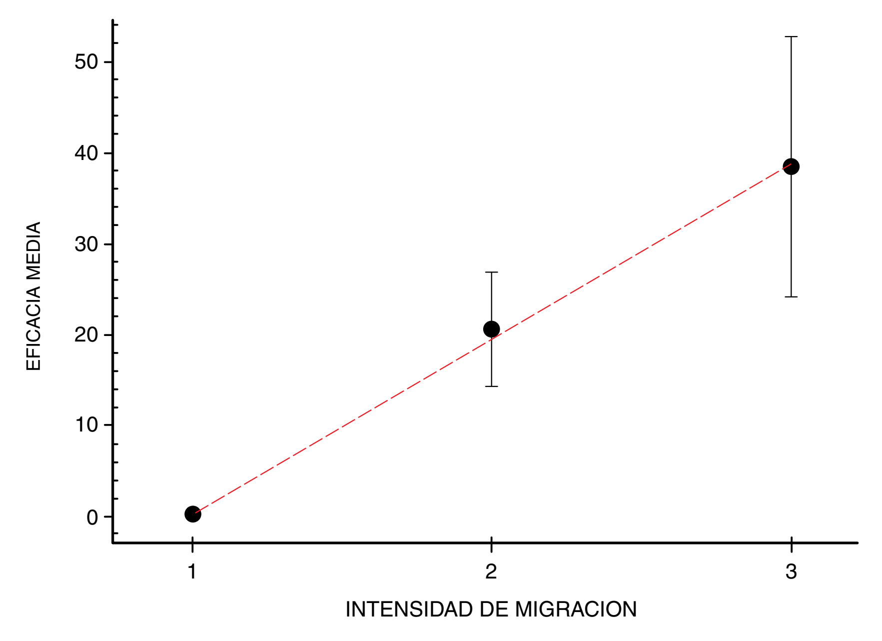




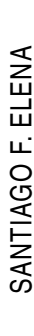
5. ADAPTACION a distintos tipos de hospedadores celulares. En *a* se ofrecen los resultados de un experimento de adaptación a dos tipos celulares distintos (células humanas HeLa y de perro MDCK). Se dejó que un virus que infectaba las células de conejillo de indias (BHK) evolucionara en los nuevos tipos celulares. Al principio del experimento, el virus se replicaba bien en células BHK, pero muy mal en HeLa o MDCK. Al final del experimento, el virus evolucionado en HeLa se replicaba bien en HeLa, aunque seguía reacio a multiplicarse en MDCK; y, lo que encerraba mayor intriga, había perdido su capacidad para hacerlo en BHK. Se obtuvieron resultados similares con el virus adaptado a MDCK. En el caso representado en *b*, la evolución tuvo lugar en un ambiente celular que fluctuaba diariamente entre HeLa y MDCK. Las fluctuaciones podían ser siempre en la misma dirección (por ejemplo, HeLa-MDCK; lo que en biología evolutiva se conoce como un ambiente fluctuante correlacionado o AFC) o completamente aleatorias (lo que se conoce como un ambiente fluctuante aleatorio, o AFA). Al final del experimento, se midió la eficacia biológica del virus resultante en ambos tipos celulares y se comparó con la obtenida cuando el ambiente nuevo era constante (*a*). En todos los casos, los virus mostraban la máxima eficacia posible, a saber, la del que había evolucionado en el correspondiente ambiente simple.



6. RESISTENCIA A FARMACOS ANTIVIRICOS y su coste en términos de eficacia biológica. El VSV es sensible a altas concentraciones de interferón; en su presencia muestra una eficacia muy baja, mientras que en su ausencia se replica con normalidad. En el experimento ilustrado, se dejó evolucionar un clon de VSV en presencia de concentraciones inhibidoras del fármaco y, pasado cierto tiempo, se midió su eficacia en presencia y ausencia del mismo. El virus se había adaptado a la nueva situación y se replicaba en presencia de interferón. Pero si el fármaco se retiraba del medio, la replicación del virus procedía con dificultad. Las mutaciones que resultaron ser beneficiosas en presencia del interferón tenían un efecto deletéreo en su ausencia.



7. EFECTO DE LA MIGRACION en la eficacia biológica vírica. Si las poblaciones víricas se encuentran subdivididas en el interior de un organismo infectado donde habrá virus replicándose en distintos tejidos, el grado de adaptación global dependerá de las mutaciones beneficiosas que hayan aparecido en cada subpoblación y de la facilidad con que estas mutaciones puedan expandirse a todo el sistema. A medida que aumente la migración entre las subpoblaciones, las mutaciones beneficiosas podrán colonizar nuevas subpoblaciones con el incremento consiguiente de la eficacia promedio.



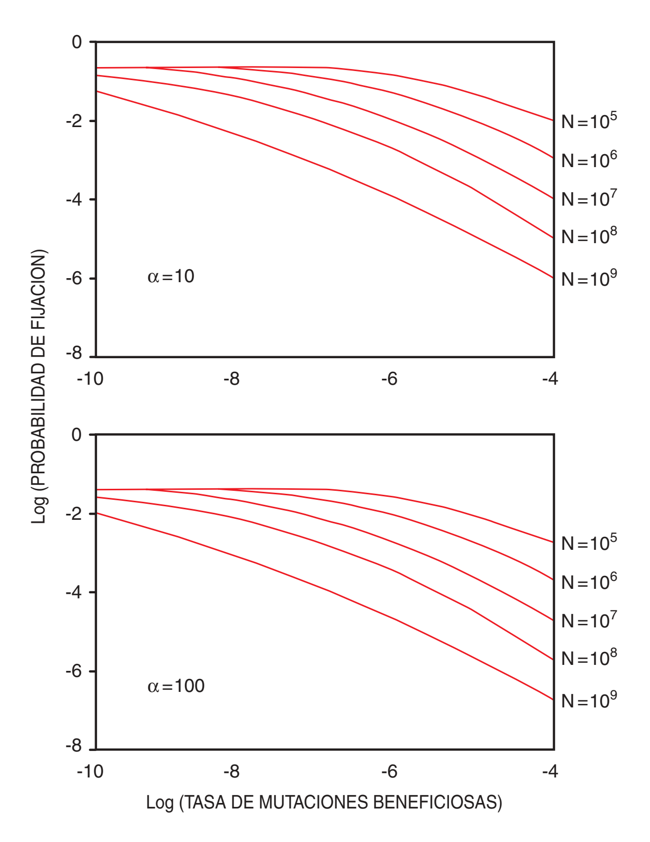
lejos del óptimo adaptativo, hay muchas características fenotípicas que mejorar. Cualquier cambio que ocurra provocará, a buen seguro, un aumento en la eficacia biológica. A medida que la población se aproxima al óptimo, se requieren mutaciones cada vez más específicas. Una vez que la población vírica se adapta a la nueva situación, no suelen darse ulteriores cambios.

Las pruebas aportadas sobre la rápida evolución de los virus de ARN planteaban dos preguntas, una relativa a la facilidad con que podrían adaptarse a los nuevos hospedadores y, la otra, sobre su capacidad replicativa ante nuevos fármacos antivíricos. Ambas cuestiones resultaron tener respuesta afirmativa.

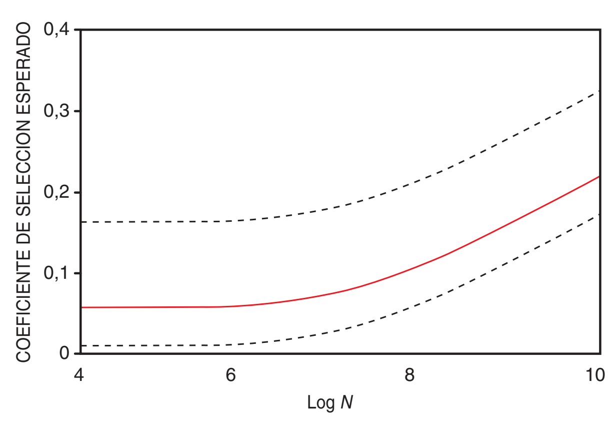
Los clones de VSV mantenidos durante años en cultivos de fibroblastos de riñón de conejillo de indias (células BHK) se adaptaron muy pronto a vivir en células epiteliales caninas (MDCK), células cancerosas humanas (HeLa), tejido conectivo de ratón (L929) y células del mosquito *Lutzomyia longipalpis* (LL-5). Pero, vale la pena subrayarlo, la adaptación a estos nuevos ambientes celulares, y el consecuente aumento en eficacia biológica, no comportó ningún aumento paralelo en la eficacia biológica en el hospedador original BHK, ni en ningún hospedador nuevo alternativo.

Debía haber, pues, un coste, en términos de eficacia biológica, asociado a la ampliación del abanico de posibles hospedadores. No obstante, si la evolución tenía lugar en un ambiente fluctuante, donde podían ser de dos tipos las células hospedadoras, se seleccionaban virus que mostraban una mayor eficacia biológica en ambos tipos. Así lo demostraron los grupos de Holland y Domingo trabajando con el VSV y de Scott Weaver, de la Universidad de Texas en Galveston, haciendo lo propio con el VSV y con el virus de la encefalitis equina del Este.

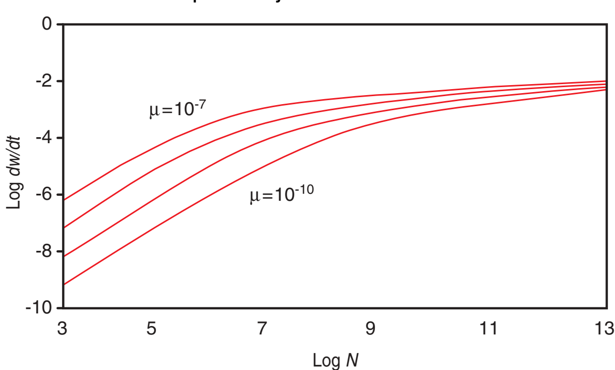
Los investigadores promovieron la evolución de sus virus respectivos en cultivos celulares. Tales cultivos alternaban diariamente entre células BHK y de mosquito. (Holland y Domingo emplearon células LL-5 y Weaver células C6/36 procedentes del mosquito *Aedes albopictus*.)



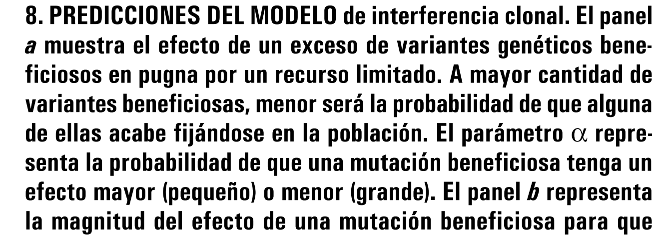
a Efecto de la disponibilidad de mutaciones beneficiosas en la probabilidad de fijación



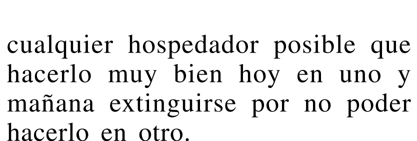
b Efecto del tamaño poblacional en el efecto beneficioso que se fijará



c Efecto de la disponibilidad de mutaciones beneficiosas en la tasa de adaptación



8. PREDICCIONES DEL MODELO de interferencia clonal. El panel *a* muestra el efecto de un exceso de variantes genéticos beneficiosos en pugna por un recurso limitado. A mayor cantidad de variantes beneficiosas, menor será la probabilidad de que alguna de ellas acabe fijándose en la población. El parámetro α representa la probabilidad de que una mutación beneficiosa tenga un efecto mayor (pequeño) o menor (grande). El panel *b* representa la magnitud del efecto de una mutación beneficiosa para que ésta se fije en una población de un tamaño creciente: cuanto mayor sea la población, mayor tendrá que ser el efecto asociado a una mutación para que se produzca su fijación. En *c* se ilustra la relación entre la disponibilidad de mutaciones (el producto entre el tamaño poblacional *N* y la tasa de mutación) y la velocidad con que una población se adapta. Para poblaciones grandes existe un límite a la velocidad de adaptación impuesto por la interferencia entre distintos mutantes beneficiosos.



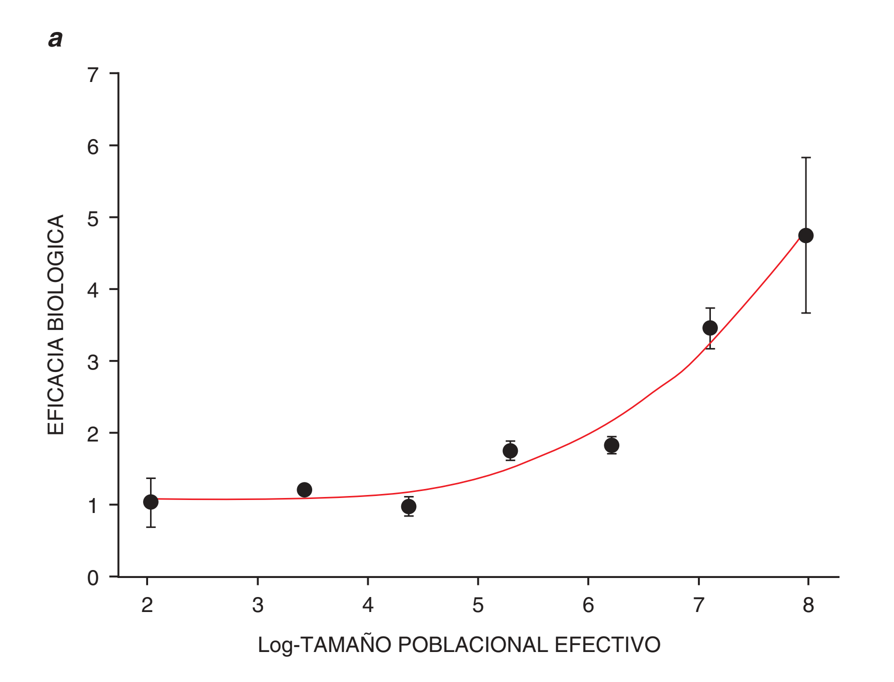
Al final del experimento, midieron la eficacia biológica del virus resultante en BHK y en células de mosquito. Compararon luego esos resultados con los obtenidos de virus que habían evolucionado en un solo tipo celular. Los virus evolucionados en un tipo celular exclusivo mostraban una alta eficacia biológica en ese tipo, pero muy baja en el tipo alternativo; los virus que habían evolucionado a la vez en sendos tipos mostraban valores elevados de eficacia en ambos tipos celulares. No había, pues, ninguna concesión, ninguna transacción en el grado de adaptación a dos hospedadores simultáneos. De darse un compromiso, valdría más replicarse moderadamente bien en cualquier hospedador posible que hacerlo muy bien hoy en uno y mañana extinguirse por no poder hacerlo en otro.

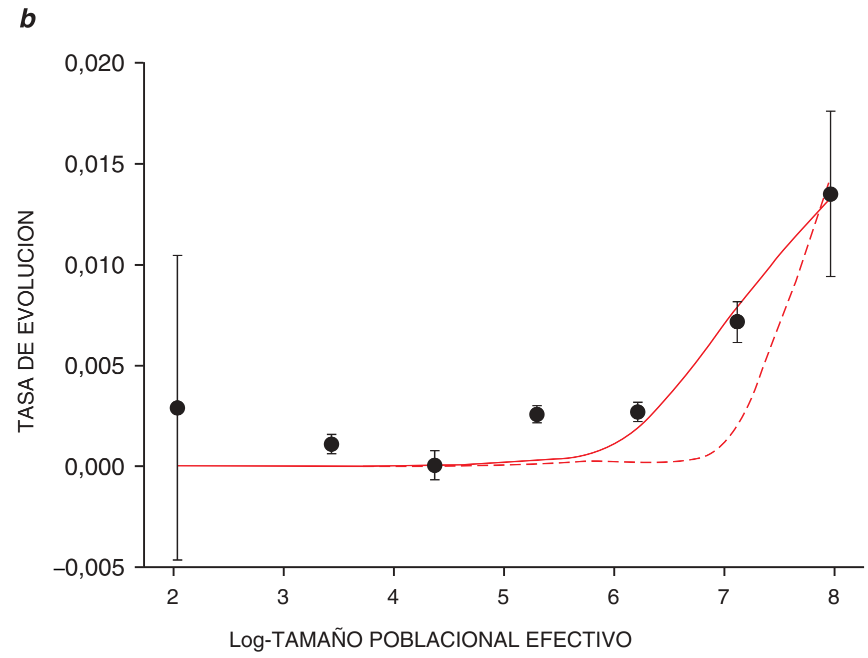
¿Es reversible la adaptación a un nuevo hospedador? Holland, Domingo y nosotros demostramos que los clones de VSV adaptados para replicarse en infecciones persistentes de células LL-5 y, por tanto, de eficacia biológica bajísima en células BHK, recuperaban eficacia biológica en mamíferos tras siete días de replicación en BHK. Este virus readaptado a BHK recuperó también su perdida neurovirulencia en ratones.

El VSV no suele replicarse en células sometidas a concentraciones altas de α-interferón, fármaco de uso habitual en el tratamiento de la hepatitis C y otras enfermedades víricas. Pero los clones de VSV que evolucionaron en presencia de interferón desarrollaron resistencia al fármaco. Holland, Domingo y nosotros comprobamos que estos clones de VSV presentaban una notable eficacia biológica en presencia del fármaco; mas, para nuestra sorpresa, cuando éste se eliminaba, los virus resistentes eran harto peores que los virus sensibles a la medicina. De ello se desprende que los virus de ARN adquieren presto resistencia contra los fármacos antivíricos y que, en ausencia de la medicación, merma la eficacia biológica.

La población vírica puede subdividirse en subpoblaciones menores,







9. RESULTADOS EXPERIMENTALES obtenidos con el VSV que confirman las predicciones del modelo de interferencia clonal. La gráfica superior ilustra la relación entre tamaño poblacional y efecto beneficioso que se fijará en la población; la gráfica inferior, la relación entre tamaño poblacional y tasa de evolución. La línea de trazo discontinuo representa una relación lineal, mientras que la línea de trazo continuo representa una relación como la mostrada en el panel C de la figura 8. El ajuste de los datos experimentales a la curva predicha por el modelo de interferencia clonal es estadísticamente mucho mejor que el ajuste a un modelo en el que no existiese un máximo en la tasa de adaptación.



llamadas demes. Si a cada deme se le permite evolucionar en condiciones similares, las mutaciones beneficiosas aparecerán y se fijarán de un modo independiente. Debido a la naturaleza aleatoria de las mutaciones, es probable que de la adaptación en cada deme se encarguen mutaciones distintas.

Si aumenta el flujo genético entre demes, las mutaciones beneficiosas se esparcirán por el sistema, facilitando así la competencia entre éstas. En virtud de la competencia, se fijará en todos los demes la mejor de las posibles mutaciones beneficiosas, con el aumento consiguiente de la eficacia biológica promedio de las fracciones subpoblacionales.

En este contexto, los demes pueden entenderse de dos maneras: como subpoblaciones víricas geográficamente aisladas o como subpoblaciones víricas adaptadas a órganos específicos dentro de un mismo individuo infectado.

Límite de la adaptación

La presencia de tanta variabilidad beneficiosa es un arma de doble filo, que puede reducir la tasa de adaptación. Para entender esa aparente paradoja, Philip Gerrish y Richard Lenski, de la Universidad estatal de Michigan, elaboraron el siguiente modelo. En una población asexual de tamaño grande, pueden crearse, por diferentes mutaciones beneficiosas, dos o más linajes contemporáneos. Cuando esto ocurre, el linaje portador de la mutación más beneficiosa acabará por desplazar al resto. La interferencia entre linajes reduce la probabilidad de fijación de cualquier mutación beneficiosa, incrementa la magnitud del cambio en la eficacia y aumenta el tiempo transcurrido entre fijaciones consecutivas de mutaciones beneficiosas.

Nuestro trabajo demostró que estas predicciones del modelo de interferencia clonal se cumplían en poblaciones experimentales de VSV. Cuanto mayor era la población vírica, mayor fue el efecto beneficioso asociado a la mutación que se fijaba en la población. En otras palabras, el aumento de la competencia entre variantes genéticas pertenecientes a una misma población garantizaba que se fijara únicamente el mejor genotipo posible. Y lo que revestía mayor importancia, la tasa de adaptación disminuyó al aumentar el tamaño poblacional. La razón: se requerían tiempos más largos hasta que una mutación ganaba en su competencia frente a un número creciente de otras variantes genéticas menos beneficiosas.

Nuestros datos también nos permitieron estimar la frecuencia con que las mutaciones beneficiosas se generaron, así como el efecto beneficioso promedio de cualquiera de estas mutaciones. Alrededor de una en cada 100 millones de mutaciones producidas puede considerarse beneficiosa. Con ello aumentó un 30 % la eficacia del virus que portaba alguna de las mutaciones beneficiosas producidas (aunque no necesariamente fijadas). Aquí, casi todas las mutaciones producidas serán deletéreas sin apenas recortar la eficacia biológica. Las contadas mutaciones beneficiosas que se producen, con el enorme efecto asociado a ellas, garantizan, empero, su fijación en la población.

Del modelo de la interferencia clonal se deducían algunas conclusiones importantes para entender la evolución de estos virus. En primer lugar, el reemplazamiento de una variante vírica mayoritaria por otra generada a raíz de una mutación es un suceso esporádico, independientemente del tamaño de la población y de la frecuencia de mutaciones beneficiosas.

En segundo lugar, la tasa de adaptación no depende de un aumento en la disponibilidad de mutaciones. Frente a lo postulado por varios autores, no parece que la elevada tasa de mutación que muestran los virus de ARN haya evolucionado como consecuencia del potencial adaptativo que dicha tasa pudiese conferir. Antes bien, una reducción en la tasa de mutación podría beneficiar a las poblaciones víricas, al reducir la tasa con que se acumulan mutaciones deletéreas y así frenar el efecto del trinquete de Müller. Nos inclinamos a pensar que esta tasa de mutación es una consecuencia de una necesidad impuesta por su modo parasitario de vida: mantener un genoma lo más reducido posible, fácil y rápidamente replicable, frente a la opción alternativa de un genoma complejo que determine la maquinaria enzimática necesaria para detectar y corregir los errores producidos durante la replicación.

En tercer lugar, una población vírica residente en un determinado lugar estará protegida contra la invasión por una variante externa más beneficiosa en razón de su ventaja numérica. Si la variante vírica invasora apenas se ha extendido al principio, es probable que aparezca alguna mutación beneficiosa en el genotipo más frecuente, mejorando su eficacia y obstruyendo la labor del invasor hasta su propia eliminación.

Conclusiones

En una revisión que publicamos en 1994 Holland, Domingo y nosotros mismos proclamábamos que el campo de la biología evolutiva de poblaciones víricas acababa de nacer. Algo ha crecido el niño. Desde entonces se han presentado numerosos datos experimentales y modelos teóricos. Los datos respaldan la idea del enorme potencial adaptativo e ingente variabilidad genética de los virus de ARN. La mutación, la fuente última de esta variabilidad, es la responsable de tamaña plasticidad.

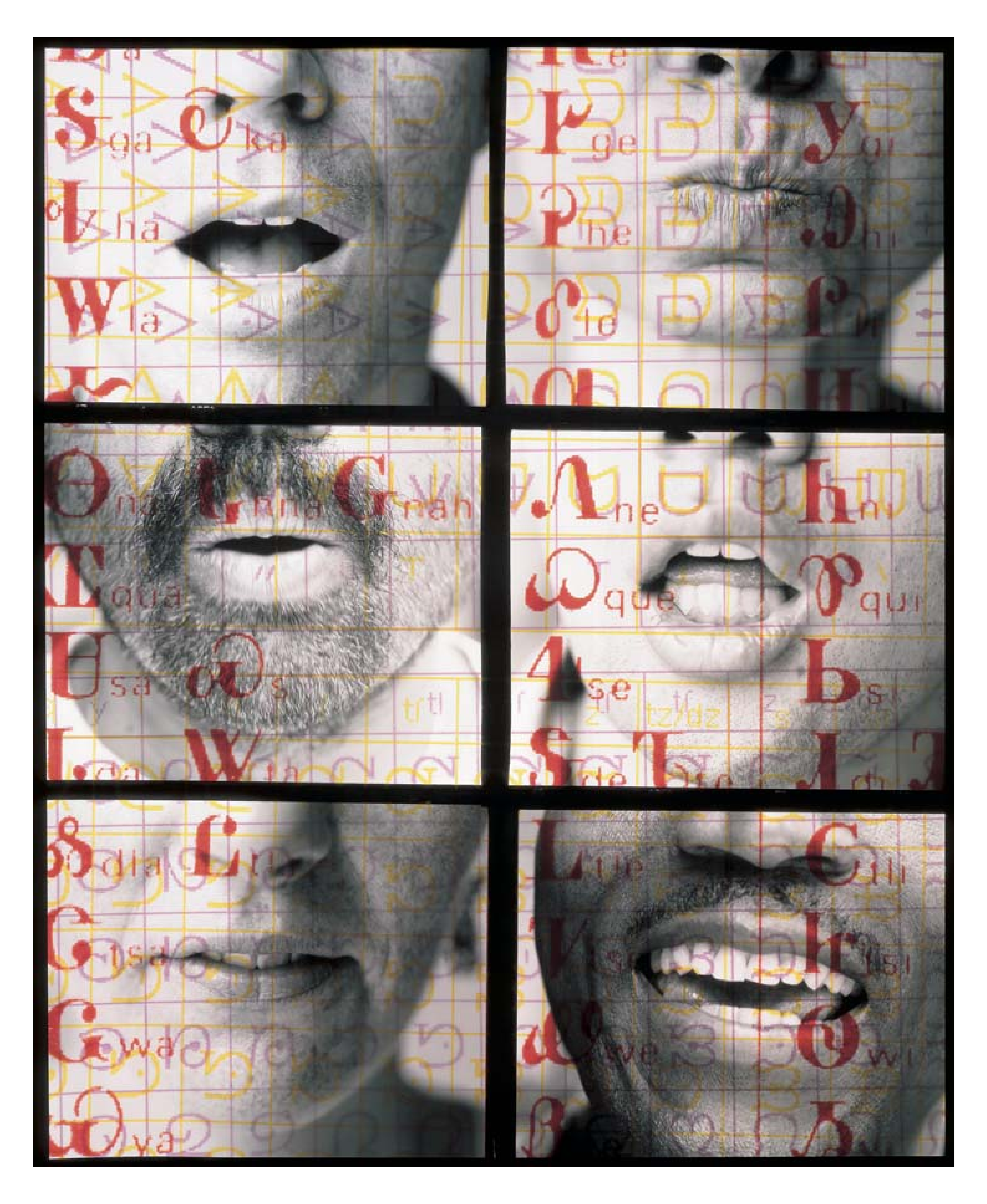
Pero las mutaciones pueden conducir a la extinción de los virus o inducirlos hacia nuevas soluciones adaptativas. Para entender la evolución adaptativa de los virus se han elaborado nuevos modelos teóricos. El tamaño poblacional constituye el factor principal; permite que la selección natural opere sobre las múltiples variantes genéticas que pueden existir en una población vírica en un momento dado.

Bibliografía complementaria

EVOLUTIONARY DYNAMICS OF FITNESS RECOVERY FROM THE DEBILITATING EFFECTS OF MÜLLER'S RATCHET. S. F. Elena, M. Dávila, I. S. Novella, J. J. Holland, E. Domingo y A. Moya, en *Evolution*, vol. 52, págs. 309-314, 1998.

CLONAL INTERFERENCE AND THE EVOLUTION OF RNA VIRUSES. R. Miralles, y P. J. Gerrish, A. Moya y S. F. Elena, en *Science*, vol. 285, págs. 1745-1747, 1999.

MUTATION RATES AMONG RNA VIRUSES. J. W. Drake, y J. J. Holland, en *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 96, páginas 13.910-13.913, 1999.



ga
ka
ha
la
ge
he
le
na
hna
nah
ne
qua
que
qui
sa
se
tsa
wa
we

La conservación de las lenguas moribundas

Hace mucho que los lingüistas saben que miles de lenguas de todo el mundo corren un grave riesgo de extinguirse, pero están dispuestos a hacer algo al respecto, y cuentan con el dinero para ello, sólo desde hace poco

W. Wayt Gibbs

Para que la lingüística no pase a la historia como la única disciplina que presidió inconscientemente la desaparición del noventa por ciento de su propio objeto de estudio, debemos replantearnos nuestras prioridades.

—Michael Krauss, "Los idiomas del mundo en crisis" (*Language*, 1992)

Hace diez años Michael Krauss sacudió al mundo de la lingüística con su predicción de que dentro de un siglo la mitad de las aproximadamente 6000 lenguas que se hablan en el mundo habrán desaparecido. Krauss, profesor de lingüística comparada en la Universidad de Alaska-Fairbanks, había fundado el Centro de Lenguas Nativas de Alaska en un intento de preservar cuanto se pudiera de las 20 lenguas aún conocidas por la población indígena del estado. De ellas, sólo dos se enseñaban a los niños. Algunas otras existían sólo en los recuerdos de unos pocos ancianos; las demás estaban cayendo rápidamente en desuso. La situación en Alaska simbolizaba la pauta mundial, observaba Krauss en la revista de la Sociedad Americana de Lingüística. A menos que los científicos y los jefes de las comunidades dirigiesen un esfuerzo a escala mundial para estabilizar la decadencia de las lenguas locales, advertía, nueve décimos de la diversidad lingüística de la humanidad estarían probablemente condenados a la extinción.

La predicción de Krauss era poco más que una conjetura autorizada, pero otros lingüistas prestigiosos ya habían dado voces de aviso similares. Kenneth L. Hale, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, señalaba en el mismo número de la revista que ocho lenguas sobre las que había hecho trabajos de campo ya no existían. Una encuesta efectuada en Australia en 1990 descubrió que, de las 90 lenguas aborígenes supervivientes, 70 eran utilizadas sólo por algunos grupos de edad. Lo mismo ocurría con casi 20 de las 175 lenguas

IRAIDA ICAZA



nativas americanas habladas o recordadas en Estados Unidos, según expuso Krauss en 1992 ante un comité del Congreso.

A primera vista, la unificación del lenguaje humano podría parecer una tendencia beneficiosa que aliviaría las tensiones étnicas y ayudaría al comercio mundial. Los lingüistas no niegan esos beneficios, y convienen en que, en la mayoría de los casos, las pequeñas comunidades deciden (a menudo inconscientemente) pasarse al idioma de la mayoría creyendo que así elevan su posición social o económica.

Por diversas razones, empero, muchos expertos en la materia lamentan la pérdida de lenguas raras. Para empezar, hay un cierto egoísmo científico: algunas de las cuestiones más esenciales de la lingüística guardan relación con los límites del habla humana y están muy lejos de haber sido del todo exploradas. A muchos investigadores les agradaría saber qué elementos estructurales de la gramática y del vocabulario, de haberlos, son realmente universales, probablemente, pues, un rasgo prefijado en el cerebro humano. Otros científicos tratan de recomponer patrones de migración antiguos comparando palabras adquiridas que aparecen en idiomas no relacionados de ningún otro modo. En cada uno de esos casos, cuanto más amplio sea el muestrario de lenguas estudiadas, mayor será la probabilidad de acertar.

"Hay que valorarlo humanamente", dice James A. Matistoff, especialista en lenguas asiáticas raras de la Universidad de California en Berkeley. "La lengua es el elemento cultural más importante de una comunidad. Cuando muere, perdemos los saberes peculiares de esa cultura y una visión singular del mundo."

En 1996 la lingüista Luisa Maffi promovió la creación del grupo Terralingua, cuyo objeto es atraer la atención hacia el vínculo entre la diversidad lingüística y la biodiversidad; ambas parecen concentrarse en muchos de los mismos países. Otro grupo internacional redactó una ambiciosa "declaración universal de los derechos lingüísticos". El borrador fue sometido a la UNESCO en 1966, que aún no ha emprendido alguna acción al respecto.

Resumen/*Lenguas amenazadas*

- En la útima edición del *Etnólogo* se da la lista de los 7202 idiomas que se hablan en todo el mundo, 440 de ellos a una o dos generaciones de la extinción. Teniendo en cuenta que puede haber errores en la calificación de los dialectos, la mayoría de los lingüstas cifran entre 5000 y 7000 el número de idiomas distintos. La mayoría también acepta que, si no lo remedian unos esfuerzos de conservación persistentes, la mitad o más de esos idiomas caerán en desuso antes de fin de siglo.
- Sólo de una reducida fracción de idiomas hay documentación suficiente como para poner a prueba las teorías acerca de una gramática universal, de la evolución del lenguaje y de otras cuestiones no resueltas de lingüstica y antropología.
- Hasta hace poco no comenzaron los lingüstas a organizar proyectos a gran escala destinados a salvar lenguas en vías de extinción. Un plan nuevo de investigación de campo, con un presupuesto de 30 millones de euros, que deberá comenzar a principios del año próximo, decuplicará los fondos destinados a ese tipo de investigaciones.

¿Se acaba la apatía?

Entristece lo pequeña que ha sido la cosecha pese al revuelo que las lenguas en peligro han armado a lo largo de los últimos diez años en los círculos lingüísticos. "Cabe pensar que habría cierta reacción organizada ante una situación tan sombría, algún intento de definir qué lenguas podrían salvarse y cuáles habría que documentar antes de que desapareciesen", afirma Sarah G. Thomason, lingüista de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. "Pero la profesión no acometió ese esfuerzo organizado. Trabajar con lenguas amenazadas sólo se ha puesto de moda hace poco."

Hace seis años, recuerda Douglas H. Whalen, de la Universidad de Yale, "cuando preguntaba a los lingüistas quiénes andaban buscando dinero para enfrentarse a esos problemas, se quedaban casi todos mudos". Así que Whalen y unos cuantos lingüistas más crearon el Fondo para las Lenguas Amenazadas. Pero en los cinco años que siguieron hasta 2001 sólo pudieron reunir unos 80.000 euros para becas de investigación. En Inglaterra, una fundación similar, dirigida por Nicholas Ostler, ha conseguido 8000 euros desde 1995. "No me parece que la situación haya cambiado en los siete años de nuestra existencia", dice Ostler. Y no es de extrañar. Según Steven Bird, de la Universidad de Pennsylvania, con tan escaso dinero, "quien desee investigar las lenguas amenazadas ha de renunciar a una carrera lucrativa y segura."

Pero hay señales alentadoras de que las cosas van cambiando. La Fundación Volkswagen, institución benéfica alemana, acaba de distribuir su segunda serie de becas, por un total de más de 2 millones de euros. Ha creado un archivo multimedia en el Instituto Max Planck de Psicolingüística, sito en los Países Bajos, capaz de albergar grabaciones, gramáticas, diccionarios y otros datos sobre las lenguas amenazadas. Para llenar el archivo, la fundación ha enviado lingüistas de campo a que documenten el aweti (unos 100 hablantes en Brasil), el ega (unos 300 en Costa de Marfil), el waima'a (unos centenares en Ti-

IRAIDA ICAZA

LA DIVERSIDAD EN PELIGRO: LENGUAS Y FORMAS DE VIDA

La mayor diversidad biológica suele coincidir con la mayor diversidad lingüística en los mismos países. Esta correlación ha impulsado a algunos investigadores a sugerir la vinculación entre ambas. Pero cuando se dibuja el mapa de los "puntos calientes" biológicos, los lugares con una máxima densidad de plantas y de vertebrados (*resaltados en naranja y rojo*), junto con el de las lenguas amenazadas o hace poco extinguidas (*puntos y cruces*), se obtiene una situación más complicada. No se advierte cuál pueda ser la vinculación entre biodiversidad y variedad lingüística, si es que existe tal dependencia mutua.

JOYCE PENDOLA; FUENTES: *ATLAS OF THE WORLD'S LANGUAGES IN DANGER OF DISAPPEARING*. SEGUNDA EDICION. UNESCO PUBLISHING, 2001; "BIODIVERSITY HOTSPOTS FOR CONSERVATION PRIORITIES", POR NORMAN MYERS *ET AL*. EN *NATURE*, VOL. 403, PAGS. 853-858; 24 DE FEBRERO DE 2000

Endemismos de plantas y vertebrados por 100 kilómetros cuadrados



Lenguas amenazadas

- ✚ Recién extinguida
- ● Moribunda
- ● En peligro
- ● Corre algún riesgo

UNA NUEVA PIEDRA DE ROSETTA

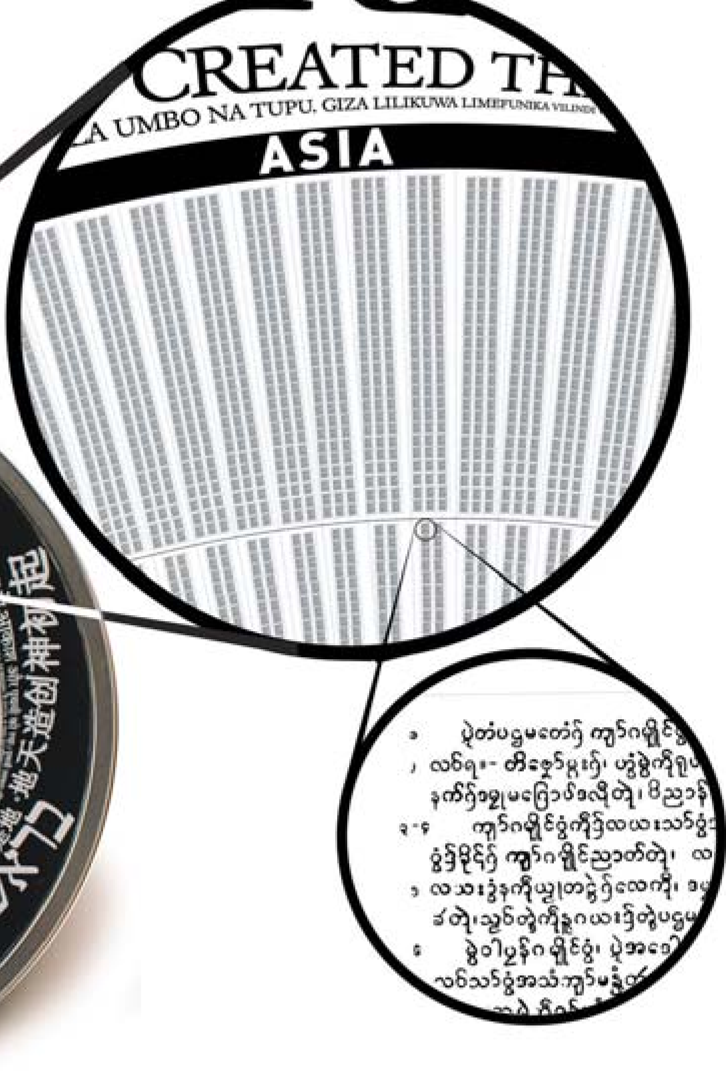
El lenguaje jeroglífico de los antiguos egipcios estuvo perdido hasta que las tropas de Napoleón descubrieron una losa de basalto de 2000 años de antigüedad en el pueblo de Rosetta, en el valle del Nilo. Grabadas en su negro anverso había tres copias del mismo texto: una en demótico, otra en griego y una tercera en egipcio jeroglífico. Con esa clave pudieron al fin los sabios desvelar milenios de historia oculta.

La piedra de Rosetta sobrevivió por azar, pero ha servido de inspiración para que un grupo de ingenieros y científicos construya un nuevo artefacto, que podría preservar algunos conocimientos básicos de las lenguas mundiales, destinado a los antropólogos de un futuro lejano. Jim Mason, director del Proyecto Rosetta de la Fundación Largo Ahora de San Francisco, afirma que el grupo va en buen camino para terminar este mismo otoño su primera "piedra".

Como la original, la nueva piedra de Rosetta contendrá textos paralelos (el primer capítulo del *Génesis*), transliterados cuando la lengua carezca de escritura. Pero su diseño le permite guardar muchos más detalles: 27 páginas de textos glosados y una descripción en inglés de 1000 lenguas. Las páginas se graban químicamente, en forma de imágenes microscópicas, sobre un disco de níquel de 75 milímetros, con un mapa en el centro que señala dónde se habla cada idioma. Para leer esa microimpresión se requiere sólo un microscopio de 1000 aumentos.

La fundación planea producir en masa los discos, junto con unas esferas de acero que los protejan, y distribuir el artilugio por todo el mundo. Se aumentará así la probabilidad de que al menos uno sobreviva para la posteridad. La aportación más importante del Proyecto Rosetta quizá no sea el disco analógico, sino la base digital de datos con listas de palabras de 4000 a 5000 lenguas que el grupo se propone completar a continuación. "Ya tenemos listas digitalizadas de palabras para 2000 lenguas", cuenta Mason. Unos científicos del Instituto de Santa Fe, añade, desean vivamente emplear la base de datos para afinar el cuadro de la evolución del lenguaje y las migraciones humanas.

A fin de llenar los vacíos en la base de datos, el equipo Rosetta abrió el año pasado un sitio Web (rosettaproject.org) donde expertos y hablantes nativos puedan presentar, examinar y contrastar listas de palabras, grabaciones sonoras, gramáticas y otros tipos de documentación. Para junio, habían aportado material 664 voluntarios (entre un 25 y 30 por ciento de ellos lingüistas profesionales). Los últimos hablantes de lenguas moribundas podrían depositar sus conocimientos en beneficio de las generaciones futuras. Por desgracia, esos últimos hablantes suelen ser ancianos, pobres y desconocedores de la informática. Pocos tienen una dirección de correo electrónico.



mor Oriental) y una docena más de lenguas que probablemente no sobrevivirán al siglo.

La Fundación Ford también se acerca a este terreno. Sus contribuciones han ayudado a revigorizar un proyecto de enseñanza de lenguas creado en 1992 por Leanne Hinton, de Berkeley, y americanos nativos preocupados por la desaparición inminente de unas 50 lenguas nativas californianas: quienes las hablan con soltura reciben 3000 dólares para que las enseñen a un pariente más joven (a quien también se paga) en 360 horas de actividades compartidas, a lo largo de seis meses. Hasta ahora han llevado a cabo este plan unos 75 equipos de "maestro y aprendiz", dice Hinton, transmitiendo al menos ciertos conocimientos de 25 lenguas.

Admite Hinton que "es muy pronto para pretender que así se están revitalizando idiomas. En California, la tasa de mortalidad de los hablantes de edad será siempre mayor que la de reclutamiento de hablantes jóvenes. Pero al menos prolongamos la supervivencia de la lengua". Así los lingüistas dispondrán de más tiempo para documentar esas lenguas antes de que desaparezcan.

Pero este método de "maestro y aprendiz" no se ha popularizado fuera de Estados Unidos. El esfuerzo de Hinton es una gota en el mar. Al menos 440 lenguas han quedado reducidas a un puñado de ancianos, según el *Etnólogo*, un catálogo de lenguas, producido por el grupo de Dallas SIL International, cuya circulación es casi mundial. La gran mayoría de esas lenguas carece casi por completo de registros de su gramática, vocabulario, fonética o usos cotidianos.

Ante esa situación, el Fondo Benéfico de Lisbet Rausing, una nueva entidad filantrópica británica, ha apartado 30 millones de euros para un proyecto de documentación masiva. Barry Supple, consejero de la fundación, afirma que el dinero probablemente se distribuya a lo largo de 8 o 10 años. Parte se donará a la Escuela de Estudios Orientales y Africanos de Londres para que adiestre a lingüistas en la documentación de campo de lenguas en vías de extinción. Pero en su mayor parte el dinero se destinará al propio trabajo de campo. Cuando éste se concluya, dice Supple, "esperamos haber documentado unas 100 lenguas amenazadas".

Una nueva Torre de Babel

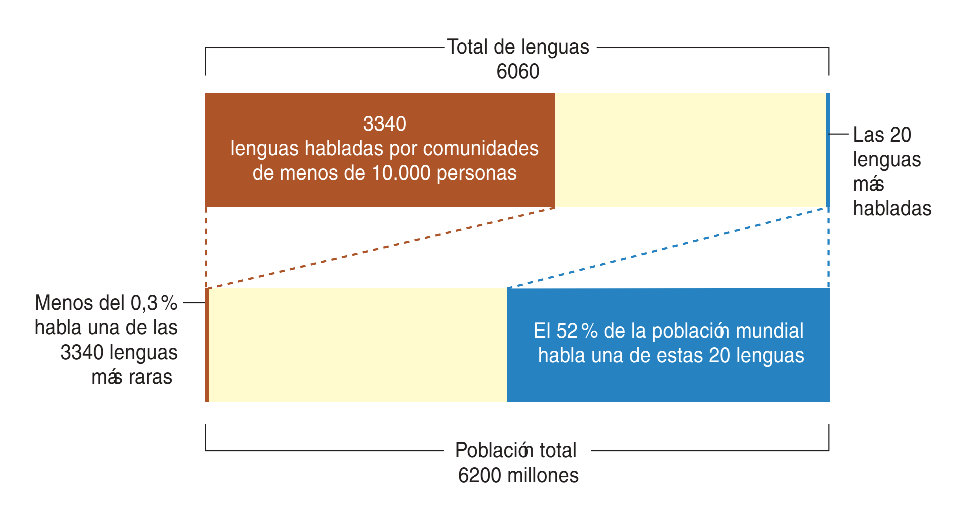
El proyecto de documentación Rausing es de mayor envergadura que cualquiera anterior. El paso clave será la consignación coherente de los registros y su conservación en un archivo seguro y accesible. Según Bird, director asociado del Consorcio de Datos Lingüísticos, "en general, nuestros archivos carecen de medios. No hay un archivo que una universidad o una fundación científica nacional se haya comprometido a mantener indefinidamente, digamos que durante 25 o 50 años". Y previene de que quizá se estén guardando esos idiomas sólo para que vuelva a perdérselos cuando las correspondientes grabaciones digitales se deterioren.

Complicando más las cosas, docenas de instituciones de todo el mundo están montando bibliotecas digitales con información sobre lenguas amenazadas. Ello podría crear una Torre de Babel de nuevo cuño, pues cada uno de esos proyectos planea emplear en sus datos formatos, terminologías y hasta nombres de lenguas sin ningún criterio compartido.

Bird, Gary F. Simons, de SIL International, y muchos otros se han esforzado por poner algo de orden en ese caos; para ello han construido una "comunidad de archivos lingüísticos abiertos" (OLAC) que casa unos registros con otros gracias a metadatos, una especie de catálogos grabados en tarjetas digitales. Creada en Norteamérica en enero pasado y en Europa en mayo, la OLAC abarca más de 20 depósitos lingüísticos, incluidos algunos de los dedicados a las lenguas amenazadas. Cuando el sistema entre en funcionamiento el año próximo, permitirá a los investigadores indagar en una vasta colección de datos; con ellos contrastarán sus teorías acerca de la evolución de los idiomas, de los límites del habla y de la relación entre la confluencia de lenguas y las migraciones de los pueblos.

Esas son las principales preguntas que a los lingüistas preocupa que puedan quedar sin respuestas con la pérdida de las lenguas raras. La lingüística es una ciencia joven, aún llena de secretos por descubrir. Ostler ofrece un ejemplo: "El ica, hablado en el norte de Colombia, parece carecer de algo comparable a un sistema de pronombres personales, yo, nosotros, vosotras, tú, ella, ello, ellos. De no ser por ese idioma, creería que este sistema es universal".

A Michael B. Maxwell, colega de Bird, le fascina la reduplicación, una característica de muchos idiomas: una repetición indica un significado, el plural por ejemplo (como si el de "gato" fuese "gatogato"). El lushootseed, idioma casi extinto de la zona del estrecho de Puget (en el estado de Washington), utiliza la reduplicación en tres formas dife-



1. MENOS DE UN CUATRO POR CIENTO de los habitantes de la Tierra conserva casi un 96 % de las lenguas del mundo.

JANA BRENNING; FUENTE: *LANGUAGE DEATH*, POR DAVID CRYSTAL. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2000

rentes: como prefijo, como sufijo y como raíz. Dice Maxwell: "Si lenguas como ésta desaparecen, nunca conoceremos los límites del funcionamiento de la reduplicación en las lenguas reales".

O considérese un diferente enigma sobre las variantes del plural. En algunas lenguas, así el español, la mayoría de las palabras son o singulares o plurales. Pero unos pocos idiomas, como el ngan'gitjemerri, lengua aborigen australiana (puede que recién fallecida a estas alturas), poseen cuatro formas nominales: singular, dual, trial (tres de una misma clase) y plural. En el sursurunga, el tangga y el marshalés hay cinco formas. ¿Cuál es el límite? Me temo que ya sea muy tarde para averiguarlo.

Mejor vivos que fósiles

Aunque una lengua esté perfectamente documentada, cuando ya no se la habla más sólo queda de ella un esqueleto fósil, un reducido número de características que la ciencia tuvo la suerte y la astucia de captar. Puede que los lingüistas sean capaces de trazar el esquema de un idioma olvidado y señalar su lugar en el árbol de la evolución, pero poco más. "¿Con qué palabras se entablaba conversación?, ¿cómo hablaban a los bebés, cómo se hablaban marido y mujer?", se pregunta Hinton. "Esas son las primeras cosas que se quiere averiguar cuando se desea revitalizar un idioma."

Pero aún no hay una disciplina que verse sobre la "lingüística de la conversación". Casi todas las estrategias ensayadas hasta ahora han tenido éxito en unos lugares y fracasado en otros; no parece que haya un modo de predecir con certeza lo que va a funcionar en cada sitio. En Nueva Zelanda, hace veinte años, los hablantes del maorí fundaron unos "nidos lingüísticos" donde se sumergía a los preescolares en su lengua nativa. Se añadieron más clases impartidas sólo en maorí conforme los niños iban avanzando en sus estudios primarios y secundarios. Un enfoque similar se probó en Hawai, con cierto éxito: se estabilizó en unos 1000 el número de hablantes nativos, según Joseph E. Grimes, de SIL International, que trabaja en Oahu. Hasta llegar a la universidad, los estudiantes pueden ahora recibir clases en hawaiano (aprenden inglés también.)

Aún es muy pronto para saber si esta primera generación salida de los nidos hablará a sus hijos en el idioma nativo dentro de casa. Y las escuelas de inmersión fundadas en otros lugares han hallado oposición tanto dentro como fuera de las comunidades. En Estados Unidos sólo uno de los idiomas nativos, el navajo, se enseña de esa manera, según el Centro de Lingüística Aplicada. La Escuela Pública Leupp, de la reserva navaja de Arizona, inició un programa de inmersión después de que una encuesta revelase que sólo



2. LA CULTURA de un pueblo indígena, como esta tribu G/wi de Botswana, se transmite por medio de su lengua nativa. Si ésta se pierde, gran parte de la tradición oral (relatos y fábulas, conocimiento del entorno local, incluso una visión particular del mundo) desaparece con ella.

un siete por ciento de los alumnos hablaba el navajo con soltura. Los niños (al principio sólo los párvulos, ahora hasta los de cuarto grado) usan el idioma mientras crían corderos, cuidan los jardines, ejecutan danzas tradicionales y se instruyen en otros aspectos de su cultura. Pero ha costado encontrar profesores cualificados, conseguir libros de texto y exámenes en navajo y ganar apoyo suficiente por parte de la comunidad.

Ofelia Zepeda, de la Universidad de Arizona, acaso la más destacada defensora entre los americanos nativos del renacer de las lenguas indígenas en Estados Unidos, describe unos problemas similares con su propio idioma, el tohono o'odham. "Como en todas las tribus del país, nuestro problema es que hay ya una generación de niños que no lo hablan. Los dirigentes apoyan los esfuerzos lingüísticos, pero el problema estriba en la financiación. Hemos esperado unos tres años para poner en marcha nuestros proyectos." Al ser tan exigua la población de la tribu, "nos sentimos impotentes; así que es fundamental conseguir el poder sobre las escuelas de nuestras propias comunidades".

Que una comunidad lingüística sea pequeña no quiere decir que esté amenazada. Según el último recuento, señala Akira Yamamoto, de la Universidad de Kansas, sólo 185 personas hablaban karitiana. Pero todas viven en una misma aldea brasileña, de sólo 191 habitantes. Así que más del 96 por ciento de la población seguía hablando en esa lengua y la enseñaba a sus hijos. Como las encuestas sobre lenguas amenazadas tienden a fijarse únicamente en el número de hablantes, "ha habido lingüistas que predijeron la muerte de una lengua y 20 años después han vuelto al mismo lugar y visto que se hablaba todavía", comenta Patrick McConvell, del Instituto Australiano de Estudios Aborígenes y de los Isleños del Estrecho de Torres (entre la península de York y Papúa), radicado en Canberra.

Según el teórico Hans-Jürgen Sasse, de la Universidad de Colonia, parece que un factor siempre presente en la defunción de una lengua es la aparición entre sus hablantes de "dudas colectivas acerca de la utilidad de la lealtad idiomática". Una vez comienzan a considerar su propia lengua como inferior a la de la mayoría, la van abandonando en todos los contextos. Los menores adoptan esa postura y prefieren el idioma dominante. "En muchos casos, los hablantes no se percatan de lo que sucede hasta que de pronto caen en la cuenta de que sus hijos no se expresan nunca en su lengua, ni siquiera en casa", dice Whalen. Así se extinguieron la lengua de Cornualles y algunos dialectos del gaélico escocés; es también la causa de que el gaélico irlandés aún se emplee raramente en Irlanda para la vida cotidiana, 80 años después de que se fundara la república con el irlandés como primer idioma oficial.

"Al final, la solución al problema de la extinción de las lenguas reside en el plurilingüismo", sostiene Matisoff, en lo que convienen muchos lingüistas. "Incluso las personas sin educación pueden aprender varios idiomas, siempre que empiecen de niños." Una mayoría de la población mundial habla más de una lengua; en Camerún (279 lenguas), Papúa-Nueva Guinea (823) e India (387) es corriente hablar tres o cuatro idiomas distintos, más un dialecto o dos.

Observa Grimes que "la mayoría de los estadounidenses, y de los canadienses al oeste de Quebec, reaccionan visceralmente cuando alguien habla ante ellos en otro idioma. Lo consideran un acto malintencionado. La misma reacción se da en Australia y Rusia. No es coincidencia que sean ésas las zonas donde las lenguas están desapareciendo con mayor rapidez". El primer paso para salvar los idiomas en trance de extinción consiste en persuadir a las mayorías del mundo de que permitan a las minorías que viven en su seno hablar con sus propias voces.

Bibliografía complementaria

THE GREEN BOOK OF LANGUAGE REVITALIZATION IN PRACTICE. Dirigido por Leanne Hinton y Kenneth Hale. Academic Press, 2001.

ON BIOCULTURAL DIVERSITY. Dirigido por Luisa Maffi. Smithsonian Institution Press, 2001.

PETER JOHNSON *Corbis*

Ordenadores sin reloj

Los chips asincrónicos elevan el rendimiento de los ordenadores al permitir que cada circuito funcione con la máxima rapidez posible

Ivan E. Sutherland y Jo Ebergen

¿A cuánto va tu ordenador?

La pregunta, por lo general, alude a la frecuencia de un diminuto reloj interno del ordenador, un oscilador de cuarzo que establece el ritmo básico de funcionamiento de toda la máquina. Por ejemplo, en un ordenador con una velocidad de 1 gigahertz el cristal emite mil millones de "tics" por segundo. Cada acción del ordenador se descompone en minúsculos pasitos que duran una milmillonésima de segundo. Una transferencia de datos simple puede exigir sólo un paso; los cómputos complejos, muchísimos. Todas las operaciones, no obstante, han de comenzar y concluir atendiendo a las señales sincronizadoras del reloj.

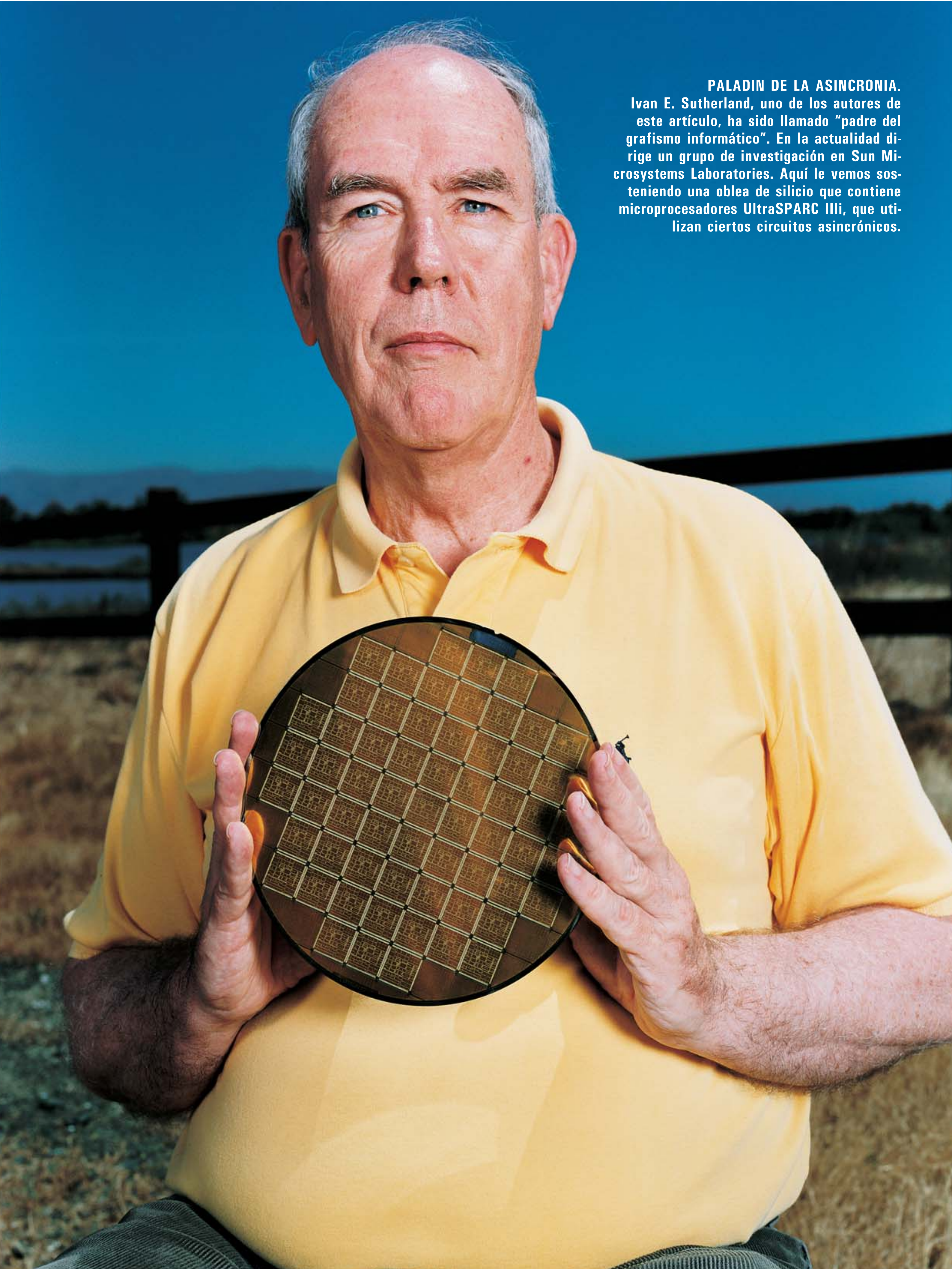
Dado que una gran mayoría de los ordenadores modernos funcionan con un único ritmo, se dice que son sincrónicos. En el interior del chip microprocesador del ordenador, un sistema de distribución lleva a los diversos circuitos las señales de sincronismo generadas en el oscilador de cristal, de igual modo que el aire lleva en un desfile hasta los soldados el redoble del tambor que les marca el paso. Como todos los elementos del chip comparten el mismo ritmo, las señales que se emiten al final de un paso sirven como señales de entrada para cualquier otro circuito en el paso siguiente. La sincronización que el reloj proporciona les facilita a los proyectistas de microcircuitos la planificación de las secuencias de acciones del ordenador.

Pero el reloj central es también causa de problemas. Con el aumento de la frecuencia de los osciladores, la distribución de las señales de sincronismo resulta cada vez más difícil. Los transistores de nuestros días son capaces de procesar datos a tal velocidad que pueden realizar varios pasos en el tiempo en que una línea de conexión traslada la señal desde uno al otro lado del chip. El mantenimiento de idéntico ritmo en todos los componentes de un microcircuito grande exige un diseño muy cuidadoso y gran cantidad de energía eléctrica. ¿No sería conveniente contar con otras opciones?

Nuestro grupo de investigación está buscándolas en los laboratorios de Sun Microsystems. A la par que diversos grupos de todo el mundo, investigamos el diseño de sistemas informáticos en los que cada sección proceda a un paso propio, en lugar de depender del ritmo fijado por un reloj central. Denominamos asincrónicos a tales sistemas. Cada parte de un sistema asincrónico puede prolongar o abreviar el lapso asignado a cada paso según sea necesario, del mismo modo que un caminante da, según convenga, pasos largos o cortos cuando marcha por terreno desigual. Algunos de los precursores de la era informática, como el matemático Alan M. Turing, trataron en los primeros años del decenio de 1950 de utilizar diseños asincrónicos en la construcción de máquinas. Pero los ingenieros no tardaron en dejar de lado tales métodos, inclinándose por los sistemas sincrónicos, porque la temporización común facilitaba mucho la elaboración del proyecto.

La computación asincrónica renace en nuestros días. Investigadores de la Universidad de Manchester, de la Universidad de Tokio y del Instituto de Tecnología de California (Caltech) han exhibido microprocesadores asincrónicos. Hay algunos, pocos, chips asincrónicos producidos ya en cantidades industriales. A punto de acabar el siglo, la compañía japonesa Sharp, fabricante de productos electrónicos, se valió de un diseño asincrónico para construir un procesador, gobernado por datos,

OLIVIER LAUDE



PALADIN DE LA ASINCRONIA. Ivan E. Sutherland, uno de los autores de este artículo, ha sido llamado "padre del grafismo informático". En la actualidad dirige un grupo de investigación en Sun Microsystems Laboratories. Aquí le vemos sosteniendo una oblea de silicio que contiene microprocesadores UltraSPARC IIIi, que utilizan ciertos circuitos asincrónicos.

no por un reloj, destinado a la edición de gráficos, vídeo y audio. Y Philips Electronics ha producido un microcontrolador asincrónico para dos de sus "buscapersonas". Están empezando a aparecer componentes asincrónicos de sistemas que, globalmente, son sincrónicos: el procesador UltraSPARC IIIi, recientemente presentado por Sun, integra unos cuantos de los circuitos asincrónicos desarrollados por nuestro grupo. Estamos convencidos de que los sistemas sin reloj irán adquiriendo cada vez mayor difusión conforme vayan los investigadores aprendiendo a sacar provecho de sus ventajas y a desarrollar métodos que simplifiquen su diseño. Los fabricantes de chips asincrónicos han conseguido logros técnicos considerables, pero el éxito comercial está por llegar. Estamos muy lejos de dar cumplimiento pleno a la promesa que la asincronía encierra.

Batir al reloj

¿Qué ventajas podrían ofrecer los sistemas asincrónicos? En primer lugar, la asincronía puede hacer que los ordenadores sean más veloces. En un chip sincrónico, el intervalo entre marcas de reloj ha de dar acomodo a la más lenta de las acciones del circuito. Si es necesaria una milmillonésima de segundo para que uno de sus circuitos lleve a cabo la función que le toque, el chip no podrá operar a más de 1 gigahertz. Aun cuando muchos otros circuitos de ese chip sean capaces de completar sus respectivos procesos en menos tiempo, habrán de esperar a que el reloj vuelva a batir antes de empezar a ejecutar el siguiente paso lógico. En un sistema asincrónico, por el contrario, cada componente dedica a cada acción el tiempo que necesite, sea poco o mucho. Las operaciones complicadas exigirán más tiempo que el promedio y las sencillas, menos. Las acciones pueden dar comienzo en cuanto se hayan ejecutado las previamente necesarias, sin esperar a que el reloj emita su siguiente latido. Por este motivo, la velocidad del sistema depende de la duración media de las acciones, en lugar de venir fijada por el tiempo invertido en la más lenta.

Resumen/*Sistemas sin reloj*

- La mayoría de los ordenadores modernos son sincrónicos: unas señales de temporización, generadas por diminutos osciladores instalados en el interior de las máquinas, coordinan todas sus acciones. Se están investigando ahora sistemas asincrónicos capaces de procesar datos sin necesidad de un reloj que gobierne.
- Los sistemas asincrónicos recurren a circuitos de coordinación local para conseguir un flujo ordenado de los datos. Los dos circuitos de coordinación más importantes son los llamados Rendezvous y Arbitro.
- Entre los posibles beneficios de los sistemas asincrónicos se cuentan: mayor velocidad, menor consumo energético y menor interferencia electromagnética. Al aumentar la complejidad de los circuitos integrados, los diseñadores de chips habrán de aprender técnicas asincrónicas.

Sin embargo, la coordinación de acciones asincrónicas también consume tiempo y espacio en la superficie del chip. Si no es necesario un gran esfuerzo para la coordinación local, un sistema asincrónico será, por término medio, más veloz que uno sincronizado. La asincronía resulta de máxima utilidad en los diseños irregulares de chips donde las acciones lentas acontecen con poca frecuencia.

Los diseños asincrónicos pueden también reducir el consumo de energía del chip. En la generación actual de microcircuitos sincrónicos grandes y veloces, los circuitos de distribución de las señales sincronizadoras ocupan buena parte de la superficie de la pastilla; hasta un 30 por ciento de la energía eléctrica consumida por ésta ha de dedicarse al reloj y a su sistema de distribución. Y por otra parte, como el reloj está permanentemente en funcionamiento, genera calor tanto si el chip está haciendo algo útil como si no.

En los sistemas asincrónicos el consumo energético de las partes del chip que se encuentran en reposo es despreciable. Esta característica reviste especial importancia en los equipos portátiles, de baterías, pero puede rebajar también el costo de sistemas mayores, porque disminuye la necesidad de ventiladores y de sistemas de refrigeración que los protejan de sobrecalentamientos. La cantidad de energía economizada dependerá de la pauta de actividad de la máquina. Los sistemas con partes que actúen sólo esporádicamente saldrán más beneficiados que aquellos que operen sin interrupción. La mayoría de los ordenadores contienen componentes, como la unidad de aritmética en coma flotante, que permanecen de ordinario inactivas durante largos períodos.

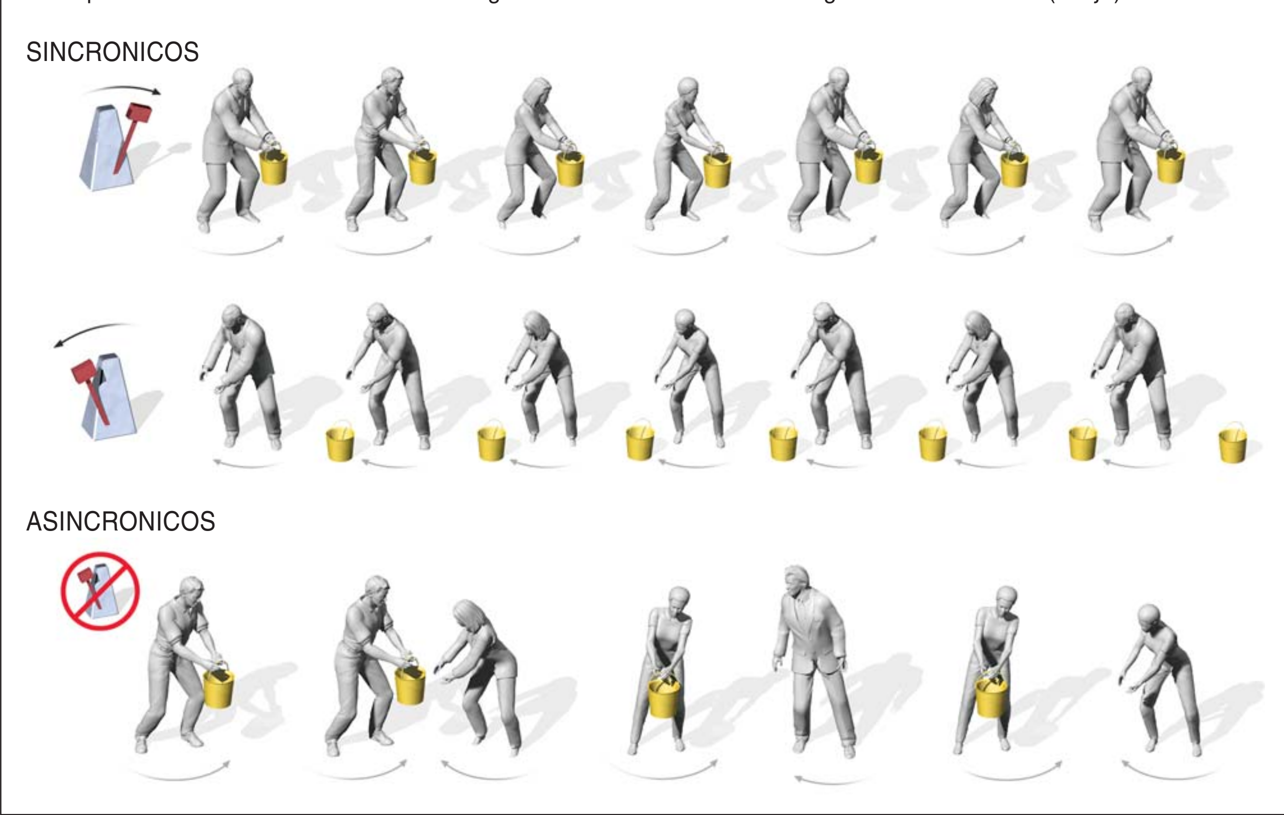
Hay otro aspecto que considerar. Los sistemas asincrónicos producen menor interferencia electromagnética que las máquinas sincrónicas. Como los sistemas sincronizados operan a un ritmo fijo, emiten, en la frecuencia correspondiente a ese ritmo y en sus armónicos, potentes emisiones de radio que interfieren en los teléfonos móviles, los aparatos de televisión y de radio y los sistemas de navegación aérea que funcionan en esas mismas frecuencias. Los sistemas asincrónicos carecen de frecuencia fija, por lo que esparcen ampliamente por el espectro electromagnético la energía que radian; es menor, pues, la que entregan a una frecuencia cualquiera.

Otra ventaja más de los sistemas asincrónicos es que pueden servir para tender puentes entre ordenadores sincrónicos que operen a distinta velocidad. En muchos grupos de ordenadores personales que funcionan al alimón ("clusters"), por ejemplo, se interconectan ordenadores rápidos con máquinas más lentas. Estos grupos consiguen afrontar problemas complejos mediante la repartición de las tareas de cómputo entre los distintos ordenadores. Un sistema de tal naturaleza es en sí asincrónico: sus distintos elementos funcionan a distintos ritmos. La traslación de datos controlados por un reloj para someterlos al control de otro requiere puentes asincrónicos: esos datos pueden estar "desincronizados" con el reloj receptor.

Por último, aunque el diseño de sistemas asincrónicos pueda resultar problemático, goza también de una

LA CADENA DE CUBOS

Podemos servirnos del símil de la cadena de cubos para describir el flujo de datos en un ordenador. Un sistema sincrónico viene a ser como una cadena de cubos en la que cada persona obedeciera al tic-tac de un metrónomo. Cuando el metrónomo da un tic, cada persona traslada un cubo hasta la siguiente en la cadena (*arriba*). Al dar un tac, cada persona toma el cubo que su predecesor le ha acercado (*centro*). Un sistema asincrónico, en cambio, se parece más a una cadena de cubos ordinaria: cada persona que sostiene un cubo lo mandará línea adelante en cuanto quien ha de recibirlo tenga las manos libres (*abajo*).



versatilidad maravillosa. Dado que los circuitos de un sistema asincrónico no tienen por qué ceñirse a un mismo ritmo, los diseñadores disponen de mayor libertad al elegir los elementos del sistema y determinar sus interacciones. Además, la sustitución de una parte cualquiera por otra versión más rápida elevará la velocidad del sistema completo. En un sistema sincronizado lo normal es, por el contrario, que para elevar la velocidad del sistema haya de aumentarse la de cada componente.

Cooperación local

Para describir el funcionamiento de los sistemas asincrónicos solemos recurrir al símil de la cadena de cubos. Un sistema sincrónico sería como una cadena en la que cada individuo tuviera que traspasar y recibir cubos atendiendo al tic-tac de un metrónomo. Cuando el metrónomo marca "tic", cada individuo traslada su cubo hacia el siguiente de la cadena; en cada "tac", ase el cubo que le ha acercado su predecesor (*véase el recuadro* "La cadena de cubos"). El ritmo de esta cadena no podrá ser más rápido que el del individuo más lento cuando haya de pasar el cubo más pesado. Incluso aunque la mayoría de los cubos fuesen ligeros, toda la cadena habría de esperar a que el reloj marcase el próximo golpe antes de traspasar el cubo siguiente.

Una cadena asincrónica está gobernada por la cooperación local, no por un reloj común. Cada persona traspasará su cubo a la siguiente en cuanto ésta tenga las manos libres. Es posible que antes de cada acción alguna vez haya de esperar a que su vecina esté lista. No obstante, si todos los cubos son ligeros, podrán ir recorriendo la cadena con mucha presteza. Además, cuando no haya agua que trasladar, todos podrán descansar. Un individuo lento frenará todavía la cadena entera; mas para devolver al sistema su pleno rendimiento será suficiente sustituir al remolón.

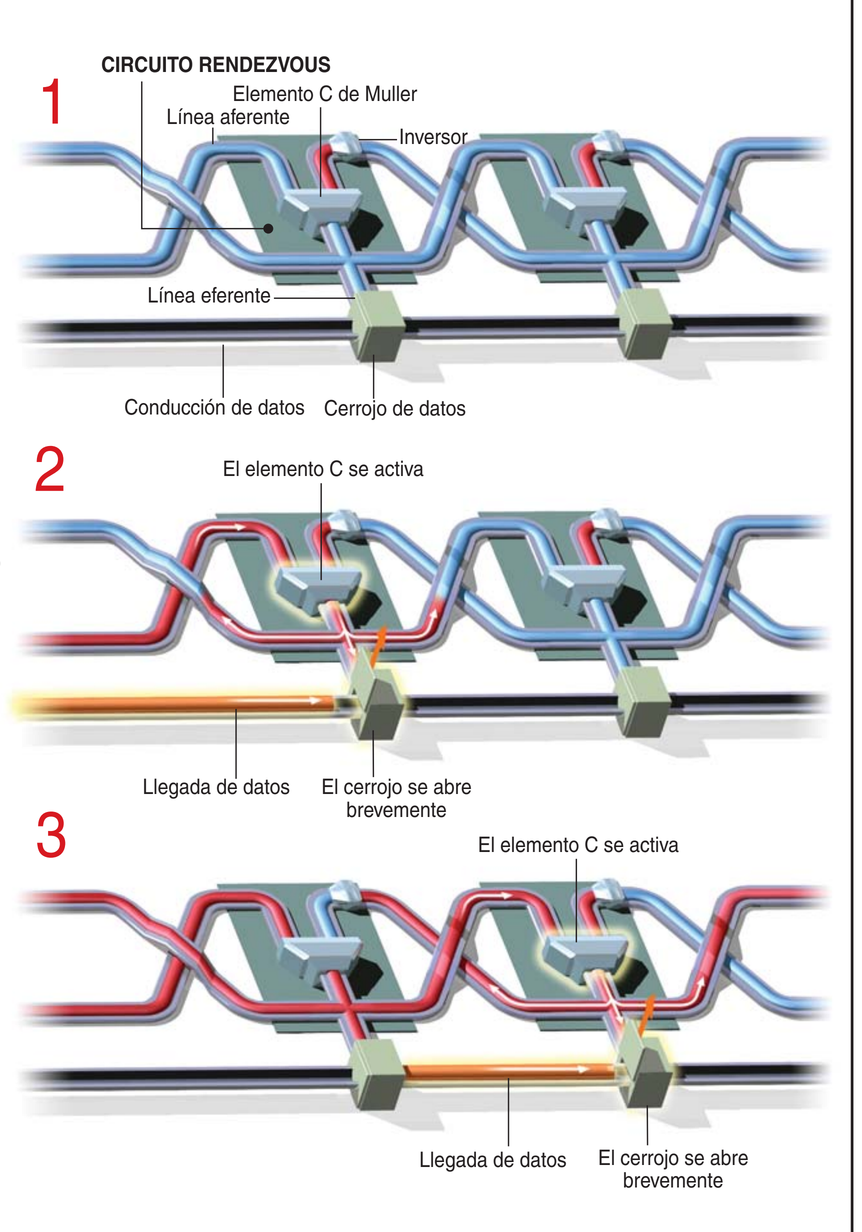
En los ordenadores, a las cadenas de cubos se las llama "conducciones" (*pipelines)*. Una conducción ordinaria ejecuta las instrucciones del ordenador. Consta de alrededor de media docena de etapas, cada una de las cuales actúa como una persona en una cadena de cubos. En lugar de trasegar cubos de agua, cada etapa ejecuta una acción según dicte una instrucción. Por ejemplo, un procesador que ejecute la instrucción "SUMA A B C" ha de buscarla en la memoria, descodificarla, obtener los números contenidos en las direcciones A

BRYAN CHRISTIE DESIGN

ASI FUNCIONA UN CIRCUITO RENDEZVOUS

Los circuitos Rendezvous coordinan las acciones de un sistema asincrónico; rigen el flujo ordenado de los datos sin necesidad de un reloj central. Se muestra aquí una conducción electrónica controlada por una cadena de elementos C de Muller, cada uno de los cuales permite el paso de los datos por la línea sólo cuando la etapa precedente está "llena" —lo que indica que los datos están listos para su traslado— y la siguiente, "vacía".

Cada elemento C cuenta con dos líneas de ingreso y una de egreso. La salida cambia a FALSO (F) cuando las dos entradas son F y retorna a VERDADERO (V) cuando las dos entradas son V. (En el esquema, las señales V se han representado en azul y las F, en rojo.) El inversor se encarga de que las entradas que van al elemento C de Muller sean diferentes, con lo que al empezar todas las etapas estarán vacías. Supongamos que la entrada izquierda sea inicialmente V y la entrada derecha, F (*1*). Un cambio de V a F en la señal aferente izquierda (*2*) indica que la etapa de la izquierda está llena, es decir, que han llegado datos a ella. Dado que ahora las entradas al elemento C de Muller son iguales, su salida cambia a F. Este cambio en la señal provoca tres efectos: hace avanzar los datos por la conducción al tornar transparente durante un breve tiempo el cerrojo de datos; envía al elemento C anterior una señal F de retorno, para vaciar la etapa situada a su izquierda; y envía una señal F al elemento siguiente, con el fin de dejar llena la etapa situada a su derecha (*3*).



y B de la memoria, efectuar la adición y almacenar la suma en la dirección C. Una conducción sincronizada ejecuta estas acciones a un ritmo que no depende de las operaciones realizadas o del tamaño de los números. La suma de 1 más 1 puede exigir tanto tiempo como la de dos números de 30 cifras. En una conducción asincrónica, en cambio, la duración de cada acción puede depender de la operación realizada, del tamaño de los números y de las ubicaciones de los datos en la memoria (tal y como en una cadena de cubos la cantidad de agua de un cubo puede determinar el tiempo que se tarde en pasarlo).

Faltos de reloj que gobierne sus acciones, los sistemas asincrónicos tienen que depender de circuitos de coordinación local. Estos circuitos se intercambian señales de terminación para que las acciones de cada estadio comiencen sólo cuando los circuitos tengan los datos que necesitan. Los circuitos de coordinación más importantes reciben los nombres de Rendezvous y Arbitro.

Un elemento Rendezvous indica en qué momento ha llegado la última de dos o más señales a una etapa determinada. Los sistemas asincrónicos utilizan estos elementos para esperar a que concluyan todas las acciones concurrentes antes de dar comienzo a la acción siguiente. Por ejemplo, un circuito de división aritmética ha de disponer tanto del dividendo (16, sea por caso) como del divisor (2, por ejemplo) antes de po-

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Los autores

IVAN E. SUTHERLAND y JO EBERGEN son firmes creyentes en la computación asincrónica. Sutherland es más conocido como precursor del grafismo informático (inventó el programa de grafismo interactivo "Sketchpad" en 1963), pero participó ya en el diseño de circuitos asincrónicos a mediados de los años sesenta, mientras construía un procesador gráfico en la Universidad de Harvard. En la actualidad es vicepresidente de Sun Microsystems, donde dirige el grupo de diseño asincrónico en los laboratorios de la compañía. Ebergen quedó fascinado por el diseño asincrónico hace 20 años, durante una estancia de tres meses en el Caltech como ayudante de investigación de Charles L. Steiz. Fue docente en la Universidad Técnica de Eindhoven y en la canadiense de Waterloo antes de incorporarse al grupo de diseño asincrónico de Sun en el verano de 1996.

der dividir el primero entre el segundo y lograr el resultado, 8.

Una forma de circuito Rendezvous es el "elemento C de Muller", que recibe su nombre de David Muller, en la actualidad catedrático jubilado de la Universidad de Illinois. Un elemento C es un circuito lógico dotado de dos vías de entrada y una de salida (*véase el recuadro* "Así funciona un circuito Rendezvous"). Cuando las dos entradas de un elemento C son VERDADERAS, la salida pasa al estado VERDADERO. Si las dos entradas son FALSAS, la salida pasa al estado FALSO. En los demás casos la salida se queda como estaba. Para que el elemento C de Muller opere como circuito Rendezvous, sus entradas no han de volver a cambiar hasta que su salida responda. Una cadena de elementos C de Muller controla el flujo de datos a lo largo de toda una cadena de cubos electrónica.

Nuestro grupo de investigación ha elaborado recientemente un nuevo tipo de circuito Rendezvous, al que hemos denominado GasP (*véase el recuadro* "Funcionamiento de un GasP"). GasP es una evolución de una familia anterior de circuitos, diseñados por Charles E. Molnar, compañero nuestro en Sun Microsystems ya fallecido. Molnar dio a su creación el nombre de asP* (iniciales de "protocolo asincrónico simétrico de impulsos"). Nosotros hemos añadido la "G". Hemos descubierto que los módulos GasP son al menos tan rápidos, y tan eficientes en cuanto al consumo de energía, como los elementos C de Muller, se adaptan mejor a los cerrojos de datos ordinarios y ofrecen una mayor versatilidad en los diseños complejos.

El asno de Buridán

Un circuito Arbitro realiza otra tarea esencial en los ordenadores asincrónicos. Es como el agente que dirige el tráfico en un cruce y decide qué vehículo pasa a continuación. Si sólo se le hace una petición, autoriza sin demora la acción correspondiente y obliga a esperar a cualquier petición posterior hasta que la primera acción haya quedado concluida. Cuando recibe simultáneamente dos peticiones, tiene que decidir cuál de las dos concede en primer lugar. Por ejemplo, si dos procesadores solicitan casi a la vez el acceso a una memoria compartida, secuencia las peticiones y concede el acceso a un solo procesador por vez. El circuito Arbitro garantiza que nunca se encontrarán en realización dos acciones al mismo tiempo, de igual modo que el agente de tráfico previene los accidentes cerciorándose de que nunca haya dos vehículos cuya trayectoria les lleve a chocar en el cruce.

Aunque los circuitos Arbitro nunca autorizan más de una petición por vez, no hay forma de construir uno que siempre llegue a tomar una decisión en un plazo de tiempo prefijado. Los disponibles en la actualidad deciden muy deprisa, de ordinario en unos cientos de picosegundos por término medio. (Un picosegundo es una billonésima de segundo.) Sin embargo, cuando han de despachar llamadas muy próximas, requieren del doble de tiempo, y en casos muy raros les lleva a inclinarse por una decisión en un plazo diez veces mayor que el normal.

La dificultad fundamental que presenta la toma de estas decisiones queda ilustrada a la perfección por la parábola del asno de Buridán, atribuida al filósofo francés del siglo XIV de ese nombre y según la cual un asno exactamente equidistante de dos pilas iguales de heno podría morirse de hambre, incapaz de decidir a qué montón acudir primero. Dilemas parecidos, de menor monta, se nos presentan en la vida cotidiana. Dos personas que se dirigen a la vez a una misma puerta seguramente se detendrán unos instantes antes de decidir quién pasará primero. El orden en que la crucen es indiferente, como lo es el montón de heno del que el asno vaya a comer primero; en ambos casos, lo que se necesita es una forma de romper el empate.

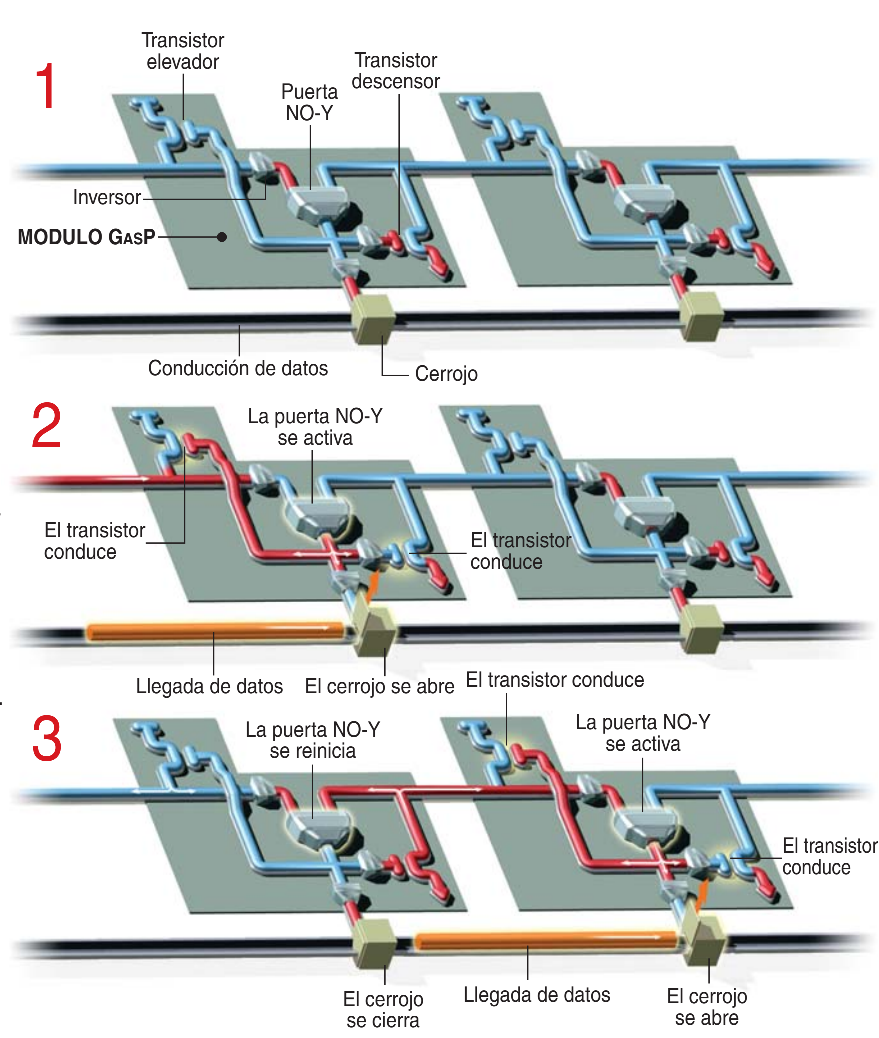
Un circuito Arbitro deshace los empates. Posee, como un biestable, dos estados estables, correspondientes a cada una de las dos opciones. Podríamos compararlos a la divisoria de aguas de una cordillera, los Pirineos, por ejemplo. Cada petición hecha al árbitro empuja el circuito hacia uno u otro de los estados estables, lo mismo que una piedra de granizo caída en la divisoria rodará hacia una u otra de las vertientes. No obstante, entre los dos estados estables habrá una línea metaestable, equivalente a la cresta de las cumbres. Si una piedra cae en la divisoria, es posible que permanezca unos instantes en equilibrio, antes de decantarse por España o por Francia. Análogamente, si dos peticiones llegan al árbitro con una separación de pocos picosegundos, puede que el circuito permanezca unos instantes en su estado metaestable antes de que alcance uno de los estados estables y rompa el empate.

Los diseñadores no muy experimentados de estos circuitos arbitrales suelen tratar de evitar las largas demoras ocasionales por medio de complicados circuitos. Un error frecuente consiste en incluir un circuito que detecte los "cuelgues" metaestables y empuje al árbitro en una determinada dirección. Sería como adiestrar al asno de Buridán para que fuese hacia la izquierda siempre que tuviera que enfrentarse a una decisión difícil. Tal entrenamiento, empero, sólo serviría para darle al asno tres opciones en lugar de dos, a saber, ir a la izquierda, ir a la derecha o decidir si la elección es difícil y entonces tirar hacia la iz-

FUNCIONAMIENTO DE UN GasP

Los módulos GasP pueden funcionar también como elementos Rendezvous para una conducción asincrónica de datos. Cada módulo GasP cuenta con dos líneas de conexión con sus vecinos y una línea de salida que acciona un cerrojo de datos. En el corazón del módulo se halla una puerta NO-Y, que produce una salida F (FALSA) solamente cuando ambas entradas son V (VERDADERA). En los demás casos, la puerta NO-Y da salida V.

Las líneas de conexión entre módulos representan las etapas de la conducción. Al principio, todas las señales de estas líneas son V (*en azul*), lo que indica que las etapas están vacías (*1*). La llegada de datos a la conducción (*2*) cambia la señal de la línea aferente a F (*en rojo*). Un inversor torna la señal en V y la envía a la puerta NO-Y, que cambia a F su salida. El cerrojo de datos se vuelve transparente y permite que los datos avancen por la conducción. La salida F devuelve también la línea de ingreso al estado V (la vacía) por medio de un transistor "ascensor" y lleva a la línea de egreso al estado F (la llena) por medio de un inversor y un transistor "descensor". La salida de la puerta NO-Y vuelve entonces al estado V (*3*), con lo que el cerrojo se torna opaco otra vez. Entre tanto, la señal F de la línea de salida inicia el mismo proceso en el siguiente módulo GasP.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

quierda. Incluso un asno adiestrado se moriría de hambre cuando fuera incapaz de decidir entre las dos últimas opciones. O, por insistir en el ejemplo geográfico, se puede desplazar la divisoria de aguas con una pala, pero no podemos librarnos de ella. Aunque no hay forma de eliminar la metaestabilidad, en la práctica se puede conseguir, mediante circuitos sencillos y bien diseñados, que los retrasos sean muy breves. Un Arbitro contemporáneo corriente tiene una demora normal de 100 picosegundos, y se retrasa 400 picosegundos menos de una vez por cada 10 horas de funcionamiento. La probabilidad de las demoras decrece exponencialmente con su duración; una pausa de 800 picosegundos acontece menos de una vez cada mil millones de años de funcionamiento.

Necesidad de velocidad

Nuestro grupo de Sun Microsystems se dedica al diseño de sistemas asincrónicos rápidos. Hemos descubierto que la rapidez es a menudo fruto de la simplicidad. Nuestro primer propósito consistió en construir una conducción en contracorriente, con dos flujos de datos de sentidos opuestos; algo así como dos cadenas de cubos que se desplazasen en sentidos contrarios. Queríamos que los datos de uno y otro flujo interaccionaran en cada una de las etapas; lo verdaderamente difícil era lograr que cada elemento de datos "de dirección norte" interaccionase con cada elemento encaminado hacia el sur. El arbitraje resultó ser esencial. En cada unión de etapas sucesivas, un Arbitro sólo permitía que pasara un elemento por vez. Este proyecto resultó de gran utilidad como objeto de investigación; mucho fue lo que aprendimos sobre coordinación y arbitraje, y construimos microcircuitos prototipo para poner de manifiesto la fiabilidad de nuestros circuitos Arbitro.

Más recientemente, nos hemos planteado un nuevo objetivo de investigación, una estructura de procesamiento a la que denominamos FLEET (significa rápido, y también flota). El nombre no sólo alude a su velocidad, sino también a que es una colección de ele-

mentos de cómputo, a cada de los cuales llamamos "nave". Cada nave realiza su trabajo a la vez que las demás; el sistema FLEET controla las acciones de cada una de ellas trasladando datos de unas a otras a través de una red de conmutación asincrónica. Nuestros trabajos con FLEET han llevado a muchos descubrimientos. Buscábamos velocidad, lo que nos condujo a la construcción de los circuitos GasP básicos. Deseábamos guiar conjuntos de datos desde una conducción a otra, como se hace con los automóviles en los enlaces entre autopistas, y eso nos llevó a diseñar una familia más amplia de circuitos GasP, capaces de actuar como un denso sistema de autopistas; transfieren datos a doble velocidad que los sistemas sincronizados. Para calibrar la velocidad de nuestras redes de conmutación solemos dotar a nuestros circuitos experimentales de anillos por los que los elementos de datos circulan como si participasen en una carrera de coches. Lo que se hace es medir el tiempo que tarda un elemento de datos en dar una vuelta al circuito, cosa harto más sencilla que la medición del tiempo, mucho menor, que tardan los datos en avanzar una etapa.

Nuestros diseños están empezando a formar parte de los productos informáticos de Sun. El chip procesador UltraSPARC IIIi cuenta con colas asincrónicas de datos que aceptan información procedente de chips de memoria (*véase la figura 1*). Ese sistema asincrónico constituye el método más sencillo y rápido para compensar las diferencias en los tiempos de llegada de señales procedentes de chips de memoria situados a diferentes distancias del procesador. Los diseñadores de productos Sun están adquiriendo confianza en su capacidad de construir componentes asincrónicos, en que funcionan, en que pueden ser sometidos a prueba y en que la asincronía ofrece ventajas importantes sobre los diseños controlados por señales de reloj. Conforme crezca esa confianza, más serán los productos comerciales que harán uso de componentes asincrónicos para alcanzar mayor velocidad y versatilidad, superior eficiencia energética y un nivel reducido de interferencias electromagnéticas.

No es Sun la única compañía que investiga los circuitos asincrónicos. Un grupo de Philips Research, en Holanda, ha desarrollado un corrector asincrónico de errores para un reproductor digital de casetes y una versión asincrónica de un microcontrolador muy conocido de dispositivos portátiles. El microcontrolador asincrónico ha sido incorporado a ciertos "buscapersonas" de esa misma firma. El éxito del grupo de investigación de Philips tiene tres orígenes. Primero, el equipo aprendió a crear con rapidez productos por medio del lenguaje de programación Tangram, que simplifica el diseño del *hardware*. Segundo, gracias al reducido consumo energético de sus circuitos asincrónicos, el buscapersonas funciona más tiempo con cada recarga de la batería. Tercero, la reducida interferencia electromagnética de sus circuitos asincrónicos permitió la inclusión en un dispositivo diminuto de un ordenador y un receptor de radio de gran sensibilidad.

Además, los experimentos realizados en Manchester, en el Caltech y por la Philips ponen de manifiesto que los microprocesadores asincrónicos pueden ser compatibles con sus homólogos sincrónicos. Se los puede conectar a equipos periféricos sin necesidad de circuitos de interfaz o programas especiales.

Tiempos problemáticos

A pesar de que la libertad de arquitectura que consienten los sistemas asincrónicos supone una gran ventaja, también plantea un difícil problema. Dado que cada componente opera a su propio paso, éste puede variar de unos momentos a otros en un sistema dado cualquiera o variar de unos sistemas a otros. Cuando hay distintas acciones concurrentes, podrán acabar en un gran número de secuencias de acciones distintas: la enumeración de todas las posibles en un chip asincrónico complejo es tan ardua como el pronóstico de las secuencias de hechos en un patio de colegio durante el recreo. Explosión de estados se llama a esta situación. ¿Lograrán los diseñadores de chips crear orden a partir del caos engendrado por la concurrencia de acciones?

Felizmente, se están desarrollando teorías para afrontar el problema. No sería necesario que los diseñadores considerasen todas las secuencias de acciones si fuera posible imponer ciertas limitaciones a las comunicaciones de cada circuito. Por volver al símil del patio escolar, la maestra puede volver más seguros los juegos enseñando a cada niño a evitar peligros.

Otra dificultad nace de la carencia de instrumentos de diseño bien probados y de métodos de ensayo aceptados, así como de la escasa difusión de la enseñanza del diseño asincrónico. Una comunidad de investigadores cada vez mayor está logrando progresos importantes, pero el total de investigación en sistemas sin reloj es bien poca cosa comparado con lo que se trabaja en sistemas sincronizados. Confiamos, no obstante, en que los incesantes progresos en la velocidad y la complejidad de los circuitos integrados acabará por obligar a los diseñadores a aprender técnicas asincrónicas. No sabemos aún si el florecimiento de los sistemas asincrónicos se producirá en las grandes compañías de electrónica o de informática, o si lo hará en empresas recién creadas, ansiosas por desarrollar ideas nuevas. Mas la tendencia de la tecnología es inexorable: en los decenios venideros, el diseño asincrónico prevalecerá. Al final no sabremos qué responder a la clásica pregunta sobre la velocidad de nuestro ordenador.

Bibliografía complementaria

MICROPIPELINES. Ivan E. Sutherland: The Turing Award Lecture. *Communications of the ACM*, vol. 32, n.º 6, páginas 720-738; junio de 1989.

ASYNCHRONOUS CIRCUITS AND SYSTEMS. Número especial de *Proceedings of the IEEE*, febrero de 1999.

PRINCIPLES OF ASYNCHRONOUS CIRCUIT DESIGN: A SYSTEMS PERSPECTIVE. Compilación de Jens Sparsø y Steve Furber. Kluwer Academic Publishers, 2001.

La cirugía en el antiguo Egipto

En el imperio de los faraones los médicos practicaban intervenciones quirúrgicas con una destreza que, diez años atrás, nadie sospechaba. La investigación reciente da fe de complejas operaciones que culminaron con éxito

Andreas Nerlich

Entre las ciencias cultivadas en el antiguo Egipto la medicina ocupaba un lugar distinguido. Lo señalan los escritores y filósofos griegos desde Homero, es decir, desde el siglo VIII a.C. En el canto cuarto de la *Odisea* leemos: "Allí todos son médicos y superan en experiencia a los de cualquier otro lugar". Los griegos llegan a equiparar a Imhotep, un mortal egipcio, con su propio dios de la medicina, Asclepios o Esculapio. Imhotep, que vivió en torno al año 2600 a.C., fue consejero, arquitecto y astrólogo del faraón Yoser, que mandó construir la pirámide escalonada de Sakkara. Dos mil años después de su muerte, a Imhotep se le seguía rindiendo en su país culto religioso; los enfermos acudían en peregrinación a los templos levantados en su honor en Menfis y en la isla de Filae. No debe sorprendernos, pues, que en la antigüedad nobles del Asia Menor y de la cuenca mediterránea viajaran al Nilo en busca de consejo médico, ni que los médicos egipcios ejercieran en las cortes de soberanos extranjeros.

Hay documentos escritos que nos hablan de su labor. En diversos papiros figuran informes detallados de cómo trataban las enfermedades. Sin embargo, apenas se incluyen técnicas quirúrgicas. Tampoco nos han llegado testimonios contemporáneos sobre el particular. En palabras del historiador griego Herodoto (*c.* 490-425 a.C.), "cada médico trata únicamente una enfermedad... hay médicos de los ojos, de los oídos, de los dientes, del estómago y médicos para determinadas enfermedades internas". Pero en su elenco de especialistas no aparece ningún cirujano. La información proporcionada por las pocas referencias escritas y gráficas se ha de completar con los estudios paleopatológicos en momias. Arqueólogos y patólogos empezaron ya con esta tarea hacia finales del siglo XIX. En las postrimerías del decenio de los años veinte del siglo pasado se elevaba ya a 30.000 el número de momias o restos de momias investigados, sin que se encontrara ni una sola cicatriz quirúrgica. Estudios posteriores de este tipo no aportaron ninguna novedad tal y como advirtió James T. Rowling en 1989. Ante esa situación, no debe extrañarnos que los arqueólogos dudaran de que se hubiesen acometido intervenciones quirúrgicas de cierta complejidad.

Nuestros trabajos con momias, empero, revelan intervenciones perfectamente planificadas, llevadas a término con suma habilidad. En los últimos siete años, buscando alteraciones patológicas en restos de momias y esqueletos procedentes de Tebas oeste, mis colegas y yo hemos encontrado pistas de todo un arte quirúrgico. En este sentido

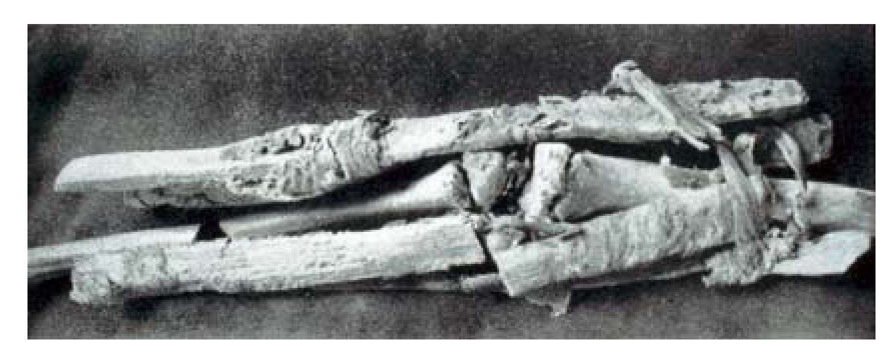
El autor

ANDREAS NERLICH dirige el Instituto de Anatomía Patológica dependiente del Hospital München-Bogenhausen. Uno de sus principales temas de investigación es el estudio de momias.

1. LA REPRESENTACION CONOCIDA más antigua de instrumentos quirúrgicos egipcios es la que figura en este relieve del muro que rodea al templo de Kom Ombo, unos 45 kilómetros al norte de Assuán. El edificio está dedicado al dios-cocodrilo Sobek y al 'honorable Horus' con cabeza de halcón. Fue construido entre los dos últimos siglos antes y los dos primeros después de Jesucristo. El relieve presenta en la primera fila cuchillos, sondas, taladros, una sierra y pinzas; en la segunda ganchos, tenazas y recipientes; y en la tercera tenazas, bolsas atadas y una balanza.

UNIVERSIDAD LUDWIG MAXIMILIAN. MUNICH (LMU)





2. FERULAS descubiertas en una momia, utilizadas en el tratamiento de una fractura reciente del húmero: el vendaje y las dos piezas de madera fijarían eficazmente la zona de fractura. Elliot Smith, en El Cairo, describió este caso ya en 1908.

colaboramos muy estrechamente con el Instituto de Anatomía Patológica de la Universidad de Munich, el Instituto de Egiptología de la Universidad de Heidelberg, el Instituto Alemán de Egiptología de El Cairo y el Consejo Supremo Egipcio de Arqueología.

Miel sobre la herida

Empecemos por releer los escritos médicos. El papiro Smith describe heridas en la cabeza y en la mitad superior del cuerpo, con sus repercusiones y las medidas terapéuticas a aplicar. El texto, que queda bruscamente interrumpido, podría tratarse de un escrito docente donde se expusiera, de forma sistemática y de la cabeza a los pies, las heridas del cuerpo humano. Muchas recomendaciones allí aportadas destacan por su claridad y oportunidad, en cabal correspondencia con las medidas terapéuticas hoy en uso.

Sírvannos de ejemplo las fracturas craneales que no afectan al cerebro, en cuyo caso la hemorragia debe tratarse con un vendaje compresor. Se prescribe en repetidas ocasiones la miel, cuyos efectos bactericidas debieron prestar un buen servicio. Por el contrario, un traumatismo craneal que ponga al descubierto el encéfalo ("cuando ves pulsar el cerebro") es considerado incurable.

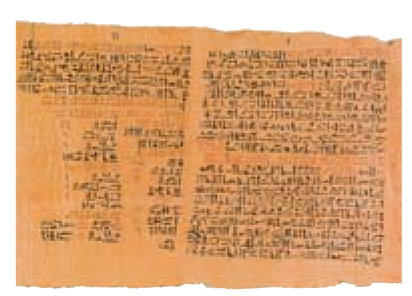
En el caso 36 de la obra se expone una fractura humeral cerrada, es decir, sin desgarro de partes blan-

PAPIROS MEDICOS

Nos han llegado doce documentos de la medicina egipcia. Se redactaron en el período, de unos tres mil años, que transcurre desde la unificación del Imperio Egipcio y el desarrollo de la escritura jeroglífica hasta el dominio de Octavio (futuro Augusto). A ellos hay que añadir numerosos textos de carácter mágico, muy breves, en los que se incluyen referencias más o menos directas a enfermedades. Las obras médicas están redactadas en lenguaje ordinario y consignadas en escritura hierática, una escritura cursiva común. Los títulos, dosis farmacéuticas y planteamientos diagnósticos se resaltaban en tinta roja.

El libro más importante dedicado fundamentalmente al tratamiento de heridas es el papiro Smith. Recibe su nombre en homenaje a Edwin Smith, aventurero y comerciante de antigüedades norteamericano que lo adquirió en 1862 de Mustafa Agha, cónsul británico en Luxor. Comprende 377 líneas en el anverso y 92 en el reverso; está datado en torno al año 1700 a.C., pero en gran parte contiene textos de 900 años antes. En el año 1930 James Henry Breasted, director del Instituto de Estudios Orientales de la Universidad de Chicago, publicó un facsímil con la transcripción, introducción, traducción al inglés y comentarios, así como con unas observaciones médicas de Arno B. Luckhardt. El papiro se conserva en la Academia de Ciencias de Nueva York.

Con sus más de veinte metros de longitud, la recopilación más amplia de conocimientos médicos es el papiro Ebers (*véase la figura*), que también fue a parar en 1872 a manos de Smith. El egiptólogo Georg Ebers adquirió el documento en 1872 para la biblioteca de la Universidad de Leipzig y, tres años más tarde, publicó un facsímil con una introducción y un glosario en inglés y otro en latín. En la obra se tratan siguiendo un orden aparentemente caprichoso enfermedades y heridas de diversas partes del cuerpo, diagnósticos, pronósticos y medios terapéuticos, haciendo referencia a la influencia de los dioses. Una nota en el reverso permite deducir que fue escrito durante el reinado del faraón Amenophis I, por lo tanto a finales del siglo XVI a.C. También en este caso parece ser que al menos parte del contenido procede de una época muy anterior.



Papiro Ebers, manual médico del tiempo de los faraones. Mide 20 metros de longitud.

El papiro Kahun, mucho más corto, contiene 34 párrafos sobre concepción, contracepción, embarazo, parto y problemas ginecológicos. La obra fue escrita en torno al año 1810 a.C. y fue encontrada por el arqueólogo Flinders Petrie en el oasis de El Fayum. Se halla en Londres.

Otros libros de medicina son el papiro Ramsiano V, con recetas contra la anquilosis y las distorsiones, y el papiro Beatty VI, que habla de los lavajes como remedio de las enfermedades del cuerpo. Otros documentos tratan de las mordeduras de serpientes, pruebas de embarazo y pronóstico del parto, así como recetas cosméticas: tintes para hacer desaparecer las canas, consejos para disimular las arrugas, contra la halitosis o para la depilación. Figuran incluso consejos de medicina veterinaria.

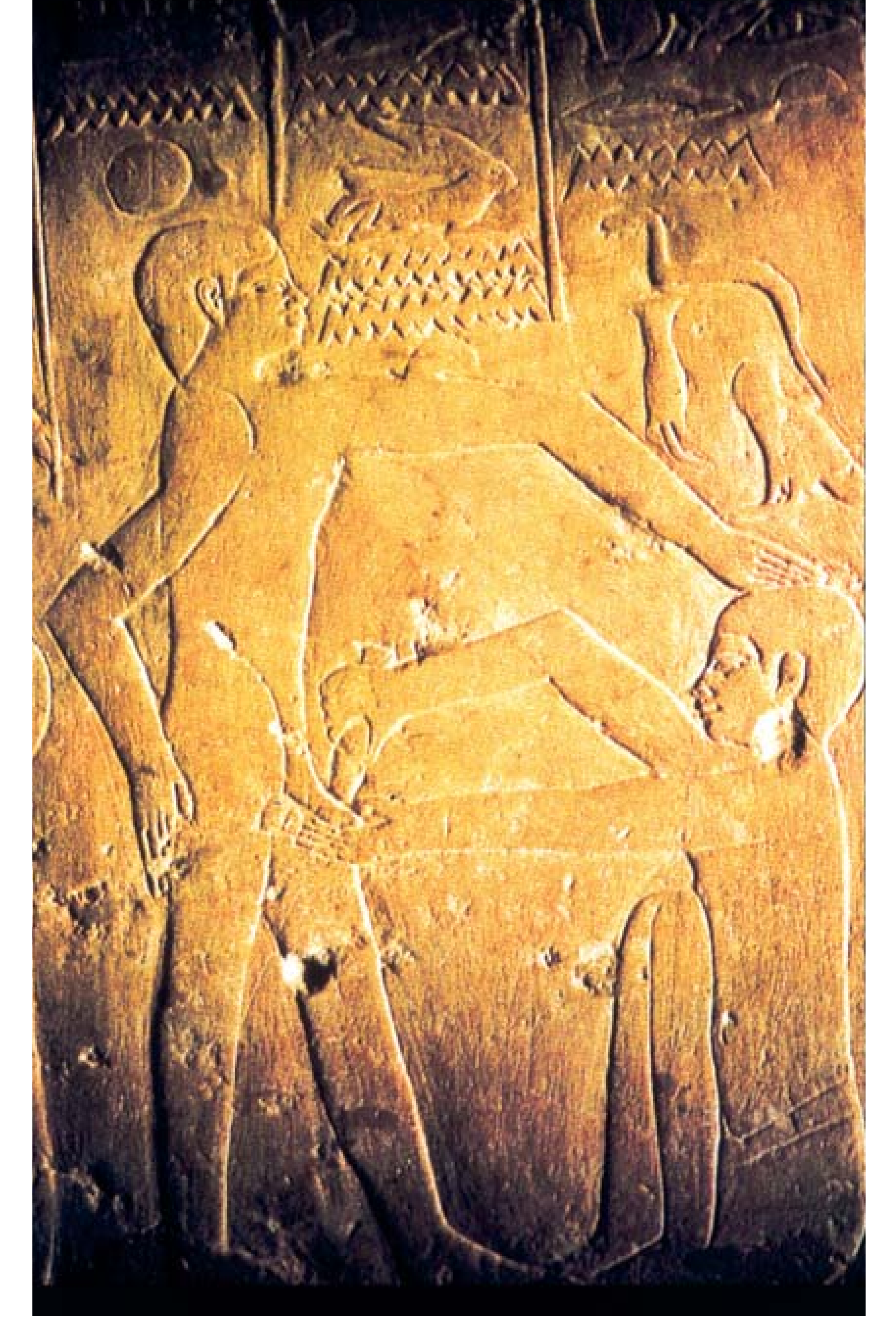


das. Se recomienda fijarla con férulas de madera, un procedimiento que fue observado en dos momias por Elliot Smith en 1908 cuando vivía en El Cairo. Probablemente, los pacientes no sobrevivieron mucho tiempo a sus heridas —una fractura de húmero y otra de fémur—, ya que en los bordes de las fracturas óseas no presentaban crecimiento cicatricial del hueso. Ciertas trazas coloreadas en las partes blandas próximas las interpretó Smith como restos de sangre, prueba de que las fracturas ocurrieron en vida y no se produjeron postmortem.

El caso 37 muestra también una fractura similar, si bien ahora abierta; una "herida que no debes tratar". Hasta tiempos muy recientes, una fractura de este tipo abocaba a un proceso séptico mortal. Evidentemente, los médicos egipcios no tenían vislumbre alguna de las infecciones bacterianas responsables.

Otros documentos médicos ofrecen información indirecta sobre medidas quirúrgicas. En el papiro Ebers se aconseja recurrir a las incisiones con el *hemem*, un cuchillo, para abrir las "hinchazones", término con el que probablemente se designaban abscesos o edemas. No está claro si esta indicación se extendía también a las hinchazones que aparecen representadas en imágenes como tumoraciones circunscritas. Tampoco se dispone de información sobre el nivel de éxitos.

En la lista de indicaciones quirúrgicas no falta la circuncisión. Debía de esperarse a la pubertad, para incluirla en el marco de las ceremonias de iniciación. (Adviértase, no obstante, que Herodoto la presenta como una práctica higiénica común.) En un relieve de la tumba del médico Anchmahor en la necrópolis de Sakkara, de la época de la sexta dinastía (2290-2157 a.C.), se ilustra la intervención con todo lujo de detalles: en la primera escena aparece un joven con las manos levantadas sostenidas por un ayudante situado detrás de él; por delante figura un sacerdote o médico en cuclillas que manipula su pene con un objeto, una esponja a buen seguro. La inscripción que acompaña a la representación recomienda "frotar enérgicamente para que sea eficaz", lo que no permite discernir si la intervención practicada es una limpieza o una anestesia local. En la segunda escena el operador aplica un cuchillo sobre el prepucio del joven. De la imagen no podemos inferir si quien actúa es un médico o un sacerdote. Según los hallazgos encontrados hasta el presente en las momias, casi todos los egipcios adultos estaban circuncidados. Aun cuando en su origen la circuncisión respondiera a una razón higiénica, no sólo servía para suprimir una fimosis, sino que constituía sobre todo una práctica religiosa, lo mismo que observamos hoy entre judíos y musulmanes.

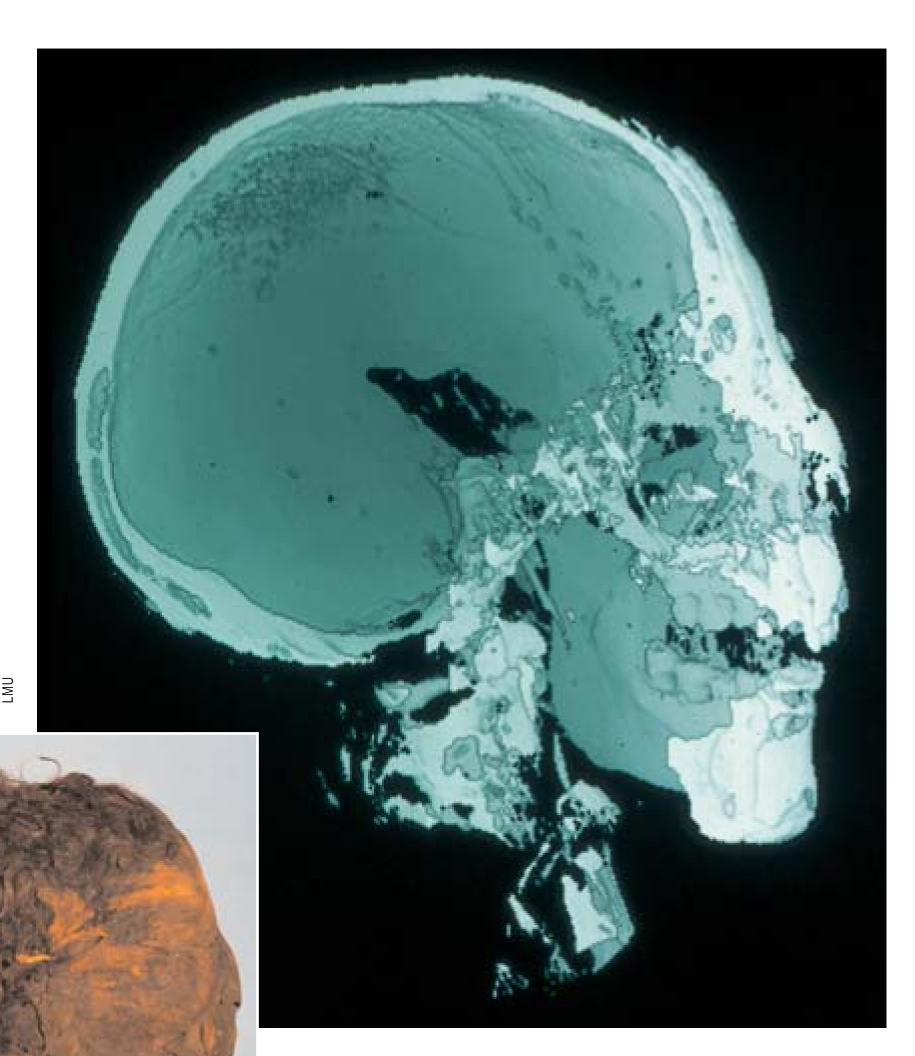


3. EL RELIEVE ENCONTRADO en la tumba del médico Anchmahor representa el ritual de la circuncisión en la época de la VI dinastía (2290-2157 a.C.).

FACILITADO POR REGINE SCHULZ, LMU MUNICH

Traumatismos craneales y amputaciones

El primer ejemplo de la existencia de un arte quirúrgico egipcio nos lo brindó el cráneo de un hombre adulto que fue llevado hace unos cincuenta años a Alemania (ignoramos los pormenores del hallazgo). Por el tipo de momificación puede deducirse que murió en la primera mitad del tercer Período In-



LMU

4. CABEZA MOMIFICADA de un hombre de la necrópolis de Tebas oeste, una vez liberada del vendaje (*izquierda*). A través de la exploración tomográfica (*derecha*) se pudo descubrir un gran defecto óseo oval por debajo de partes blandas intactas. A pesar de que la fractura se extendió en forma de embudo hacia el interior, los anatomopatólogos no encontraron ninguna astilla, signo de que se realizó una intervención limpia.

termedio (1080-714 a.C.). Bajo el vendaje, apareció intacta una capa de piel y de partes blandas junto a una abundante cabellera. Después de una inspección externa y de eliminar la resina que ocluía la nariz y los oídos, introdujimos un endoscopio en el cráneo: primero a través de ambos oídos medios, luego a través de la fosa nasal y, finalmente, a través de un orificio practicado en el techo de la faringe, por donde los embalsamadores habían extraído el cerebro.

Nos llamó inmediatamente la atención el hecho de que la cadena de huesecillos del oído estaba perfectamente conservada en el lado derecho, pero faltaba por completo en el izquierdo. ¿Fue extraída en vida o desapareció poco después de la muerte en el proceso de momificación? En la cavidad craneal reconocimos una capa plana de color marrón sobre el occipital. Este material se introducía con frecuencia en los huecos corporales como conservante y se endurecía mientras el cadáver yacía en decúbito supino. Además una singular capa de color marrón oscuro cubría a modo de tapiz una zona de la parte izquierda de la fosa craneal media.

La tomografía computarizada nos deparó una sorpresa: bajo una piel y tejidos blandos intactos, en el hueso parietal izquierdo, por encima de la oreja, apareció un gran defecto oval del hueso, producido sin duda por un golpe fuerte. Desde el borde superior de la fractura se dibujaba una grieta que se prolongaba por la calota craneal. En sus bordes podían reconocerse algunas zonas de hueso neoformado. El estudio histológico de una pequeña muestra corroboró que la herida no fue inmediatamente mortal: en algunos puntos se conservaban pigmentos propios de las hemorragias.

Mayor interés reviste que en la zona del defecto falten fragmentos de hueso. La presencia en el interior de lo que pudieran ser restos de duramadre intactos y pegados, así como de piel también intacta, abona la tesis de una intervención. Para curar la herida, el médico habría practicado una incisión en los tejidos y eliminado astillas de hueso. Los huesecillos del oído izquierdo, desplazados de su posición normal por el golpe, habrían desaparecido después de la muerte, en el proceso de momificación.

Nuestro segundo caso fue un pie momificado, procedente de un complejo funerario del oeste de Tebas. Data del período de los Ramésidas (1305-1080 a.C.), en cuyo decurso gobernaron once faraones de las dinastías XIX y XX que llevaron el nombre de Ramsés. A partir de este resto no es posible deducir ni la edad ni el sexo de la persona a quien perteneció. Pero sí nos aporta valiosa información. Casi toda la parte anterior del pie había sido amputada. La operación tuvo éxito, ya que la herida curó. Una capa intacta de piel y partes blandas cubre la línea de amputación, sin que hoy se reconozca cicatriz ni ningún otro tipo de defecto. Las exploraciones radiológicas y tomográficas demuestran que sólo se conservaron parcialmente, aunque atrofiadas, las falanges del quinto dedo. En las placas tampoco se aprecian ni malformaciones ni traza de cicatrización defectuosa.

El paciente sobrevivió, pues, varios meses, años quizá, pese a que en los huesos conservados no se demuestra ningún signo evidente de reacción cicatricial como sería de esperar. No se sufrieron complicaciones. Una infección de la

LA SANIDAD EN LA ERA DE LOS FARAONES

La medicina fue una rama muy desarrollada en el apogeo de la cultura egipcia. Sin embargo, a pesar de intensas investigaciones, seguimos ignorando muchos aspectos del tratamiento de enfermedades y heridas. El problema se ve dificultado, sobre todo, por la mentalidad de los médicos del antiguo Egipto, tan diferente de la nuestra. Por una parte, utilizaban un cúmulo de plantas curativas; en fuentes escritas se citan más de 700; de muy pocas de ellas se ha identificado el principio activo. Por otra parte, apenas tenían conocimientos de la anatomía y del funcionamiento del cuerpo humano, pese a haber abierto sistemáticamente miles de cadáveres y extraído sus vísceras para su momificación. Creían que el corazón constituía la sede del pensamiento y del sentimiento; no se extraía en el proceso de momificación. Los egipcios lo consideraban centro de un sistema vascular que transportaba a todas las partes del organismo sangre, agua y aire, así como lágrimas, orina y esperma.

Mezclaban métodos empíricos, con cierta base científica, y actuaciones mágicas (interpretaciones de los sueños y aplicación de conjuros, amuletos y sustancias diversas como puedan ser las heces de cocodrilo utilizadas como píldoras contraceptivas). La causa de enfermedades que hoy conocemos como infecciones debidas a microorganismos era atribuida a "hombres y mujeres dañinos" que podían ser "vivos o muertos", según se lee en el papiro Smith. En un conjuro que figura en el papiro Ebers se escribe: "Sal fuera, tú resfriado... que rompes los huesos, agrietas el cráneo, atenazas el cerebro y haces daño en los siete orificios de la cabeza". Parece ser que estas prácticas mágicas llegaron a su apogeo en el Imperio Nuevo, es decir, en torno al año 1550 a.C.

Ello no empece que algunos papiros ofrezcan métodos diagnósticos y terapéuticos completamente acordes con el estado actual de nuestros conocimientos. Por ejemplo se recomienda el aceite de ricino como laxante, el humo del incienso como antiálgico o la raíz del granado para el tratamiento de gusanos intestinales. Estos productos vegetales siguen utilizándose en nuestros días. Con toda razón, para la ceguera nocturna, que puede deberse a una falta de vitamina A, se recomienda hígado de animales, para el dolor de cabeza apósitos húmedos, para la tos leche y miel, para el estreñimiento un enema, para los esguinces vendaje y masajes diarios. A Herodoto le sorprendió la limpieza general que imperaba en el antiguo Egipto; según sus informes, al menos los sacerdotes, se bañaban dos veces durante el día y otras dos durante la noche y cada tres días se afeitaban no solamente la cabeza sino todo el cuerpo "para que no puedan fijarse en los pelos ni piojos ni cualquier otro tipo de parásito".



PROTECTORA DE LOS MEDICOS, la diosa Sekhmet, con cabeza de león, era la esposa de Ptah, dios principal de la ciudad de Menfis. Sus atributos eran, por un lado, la sangre, la muerte y la destrucción, y, por otro, el poder sanador. Tales facultades se asociaron con frecuencia a medidas quirúrgicas necesarias.

herida, por ejemplo, hubiera podido dejar reacciones cicatriciales protuberantes o zonas de crecimiento anormal en el hueso. Sobre el motivo de la amputación sólo caben conjeturas. En nuestra opinión se trataría de una herida fortuita, pues no se observan signos que obligaran a una mutilación, en particular trastornos circulatorios o problemas de irrigación de la extremidad.

Una intervención similar, aunque de alcance menor, es la que superó una mujer fallecida a la edad de unos cincuenta años. Su momia está muy deteriorada, debido, suponemos, a la acción vandálica de los ladrones de tumbas. Pese a ello, ambos pies, la pierna derecha y los dos muslos estaban todavía cubiertos con un bálsamo resinoso y envueltos con vendas de lino. Nos llamó la atención la parte anterior del pie derecho: las tiras de tela disimulaban un cuerpo extraño. Se trataba de una prótesis de madera cuidadosamente tallada que sustituía al dedo gordo, amputado mucho tiempo antes de su fallecimiento.

El muñón de la articulación proximal del dedo estaba cubierto por una piel intacta y por un tejido subcutáneo en óptima conservación. No había ningún indicio de haberse presentado complicaciones en la curación de la herida. La radiografía reveló una reestructuración proliferativa en el metatarsiano correspondiente al dedo grueso. Este dato, junto a los signos de desgaste en la parte inferior de la prótesis, respalda la conclusión de que la operación se realizó varios años antes de la muerte. De todo se infiere que los cirujanos del antiguo Egipto practicaron también en este caso una amputación y consiguieron que las heridas curaran sin complicación alguna.

En posteriores exploraciones radiológicas y tomográficas comprobamos la existencia de calcificaciones, no sólo en la aorta torácica, de la que se conservaba un fragmento de unos doce centímetros, sino también en pequeñas arterias del pie intervenido. Probablemente, la arteriosclerosis dificultara la irrigación del dedo grueso y diera lugar a una necrosis que obligara a extirparlo para salvar la vida de la



paciente. Había un riesgo, puesto que en la mayoría de los casos la arteriosclerosis dificulta la cicatrización de las heridas. El éxito de la operación y la acertada colocación de la prótesis demuestran hasta qué punto fue meticuloso el cirujano al planear y llevar a cabo la intervención.

Incienso contra el dolor

A los cirujanos maxilares del Egipto de los faraones no les debió de faltar trabajo. La dentadura de los pueblos de la antigüedad se hallaba expuesta a la acción de partículas minerales contenidas en la harina, restos de las ruedas de piedra de los molinos. En Egipto, además, sufrían el polvo y la fina arena que el viento de poniente transporta desde el desierto de Libia o el viento de levante desde el de Arabia hasta la estrecha franja de tierra habitada a orillas del Nilo. Estas partículas erosionaban hasta tal punto el esmalte y el marfil, que podían dejar al descubierto la raíz dental facilitando así la colonización bacteriana. Los faraones y los altos dignatarios no se libraron de padecer dolorosos abscesos en las raíces dentales y otros problemas del aparato masticador. Lo demuestran las primeras panortografías odontológicas practicadas en las momias del Museo Egipcio de El Cairo a finales de los años sesenta del siglo XX. Se desconocen las medidas terapéuticas que se adoptaron en el campo odontológico.

Aunque tampoco nosotros hemos encontrado pruebas de intervenciones de cirugía maxilofacial, no queremos dejar de mencionar cierta mandíbula inferior, procedente de Sakkara y correspondiente al Imperio Nuevo (de 1554 o 1551 a 1080 a.C.); presenta dos orificios paralelos claramente delimitados sobre un absceso de raíz dental con signos claros de haber sido intencionadamente perforados. Los más escépticos los atribuyen a un defecto natural, muy raro, pues se han realizado análisis de miles de momias con numerosos abscesos de las raíces dentales sin haberse encontrado muestras de incisiones voluntarias.

Los indicios hasta ahora más fundamentados en favor de prácticas quirúrgicas odontológicas —puestos también en cuestión— son bastante antiguos. En 1914 Hermann Junker encontró en una momia de Sakkara dos muelas fijadas con hilo de oro. Un hallazgo similar de Shafik Farid en 1952 reforzó la idea de que los dentistas egipcios cubrían con prótesis los huecos en la dentadura. Contra esa hipótesis labora el hecho siguiente: en ninguno de estos dientes postizos se advierten señales de haber sido usados; podrían haberse implantado postmortem para que el cadáver recuperara su integridad.

En sí misma, la intervención operatoria sólo constituye un aspecto del arte de la cirugía. Hay que añadir los procedimientos para mitigar el dolor y favorecer la cicatrización. Hasta mediados del siglo XIX, las amputaciones o la extracción de un cálculo urinario se practicaban sin narcosis y, en la mayoría de los casos, sin ningún tipo de tratamiento eficaz contra el dolor. A un buen cirujano se le exigía destreza y rapidez, cualidades que no impedían que muchos pacientes fallecieran por las complicaciones cardiocirculatorias que se presentaban como consecuencia de un dolor insoportable.

Los médicos egipcios ya aplicaban desde los primeros tiempos los efectos analgésicos de ciertas plantas. El incienso estaba particularmente acreditado. Como el cannabis, el incienso contiene tetrahidrocannabinol, que, por su efecto euforizante, contribuye a mitigar el dolor. Desde el milenio III a.C., las naves mercantes transportaban a los



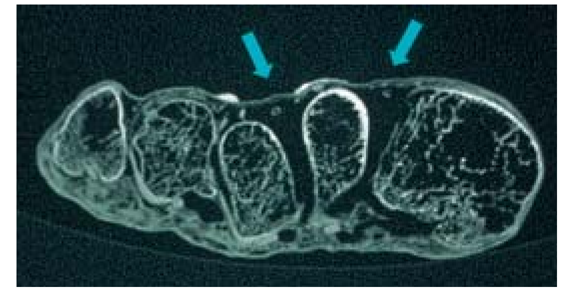
LMU

5. A ESTE PIE LE FUERON AMPUTADOS los dedos a nivel de las articulaciones metatarso-falángicas (*izquierda*). La herida operatoria curó sin dejar cicatrices ostensibles. La radiografía (*figura de la derecha*) muestra que el dedo pequeño todavía permanece; quizá pasara inadvertido en la intervención, ya que está muy poco desarrollado y termina a la altura de la articulación metatarso-falángica del cuarto dedo.









6. A ESTE PIE DERECHO se le amputó el dedo gordo, sustituido por una prótesis de madera (*arriba a la izquierda*). La paciente sobrevivió, como lo demuestra una reacción reconstructora proliferativa en el metatarsiano (*arriba a la derecha*). La tomografía del metatarso (*derecha*) pone de manifiesto calcificaciones en los vasos sanguíneos (*en blanco*) que, de no haberse realizado la intervención, hubieran conducido a la muerte de la paciente.

LMU

templos grandes cantidades de resina para su uso en el culto. La resina se importaba de la región de Punt, citada a menudo en las inscripciones, y que correspondía verosímilmente a las costas de la actual Eritrea, al sur del mar Rojo. La reina Hatshepsut (1490- 1468 a.C.) y el faraón Ramsés III (1193-1162 a.C.) intentaron, sin éxito, implantar en Egipto arbustos del incienso.

El uso terapéutico de la resina viene atestiguado por numerosas escenas de fumadores. Además, nuestras investigaciones bioquímicas han revelado la presencia de tetrahidrocannabinol en los pulmones de una momia; debió inhalar la sustancia en vida. Pero no está claro si se utilizaron otros analgésicos, como la morfina, a pesar de que se han encontrado adormideras y sus semillas en las tumbas como ofrenda a los muertos. En todo caso parece evidente que los médicos antiguos conocieron sustancias psicoactivas capaces de paliar los dolores, facilitando así la práctica de intervenciones quirúrgicas.

Cicatrices enmascaradas por la momificación

Del tratamiento de las heridas nos habla el papiro Smith. Además de la disposición de los huesos fracturados siguiendo la línea del eje del miembro, se recomiendan distintos vendajes. Ya se ha mencionado la fijación con férulas de madera. Para cubrir inicialmente la herida se utilizaba carne cruda. Un frecuente e importante componente de las pomadas utilizadas para las heridas era la miel, cuyos efectos

adhesivo, detergente y ligeramente antibiótico debieron de prestar un valioso servicio. El caso 27 de este papiro ilustra su aplicación médica: “Si te encuentras con un hombre que tiene una herida abierta en la barbilla dejando el hueso al descubierto debes palparla y si te parece que el hueso está sano debes decir: alguien que tiene una herida abierta en la barbilla que llega hasta el hueso tiene una lesión que he de tratar. Colocarás dos vendas sobre cada zona abierta y las fijarás el primer día con carne fresca, luego las tratarás diariamente con grasa, miel y fibras hasta que evolucione favorablemente”. Con estos medios y procedimientos se conseguía también la curación de las heridas quirúrgicas, como lo demuestran los casos de amputación que hemos descubierto.

En nuestra opinión, los médicos del antiguo Egipto estaban perfectamente capacitados para llevar a cabo operaciones quirúrgicas coronadas por el éxito. El hecho de no haber sido documentadas hasta ahora se debe a que las momias y otros restos humanos no habían sido estudiados anatomopatológicamente con suficiente meticulosidad. Otra razón es la deficiente conservación de las estructuras corporales blandas, por culpa de las sustancias utilizadas en los embalsamamientos que alteran la piel y otros tejidos. Además, en muchos casos las heridas debieron de curar tan bien que, como en las dos descritas de muñones de amputación, sólo dejaron unas finas cicatrices muy difícilmente reconocibles.

Bibliografía complementaria

ERWACHEN DER HEILKUNST. DIE MEDIZIN IM ALTEN ÄGYPTEN. W. Westendorf. Artemis und Winkler; Zurich, 1992.

ÄGYPTEN ZUR PHARAONENZEIT. ALLTAG UND GESELLSCHAFTLICHES LEBEN. Eugen Strouhal. Wasmuth Verlag; Tübingen, Berlín 1994.

ANCIEN EGYPTIAN MEDICINE. J. F. Nunn. British Museum Press; Londres, 1996.

ANCIEN EGYPTIAN PROSTHESIS OF THE BIG TOE. A. G. Nerlich *et al*. en *Lancet*, vol. 356, pág. 2176; 2000.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Monedas, balanzas e información

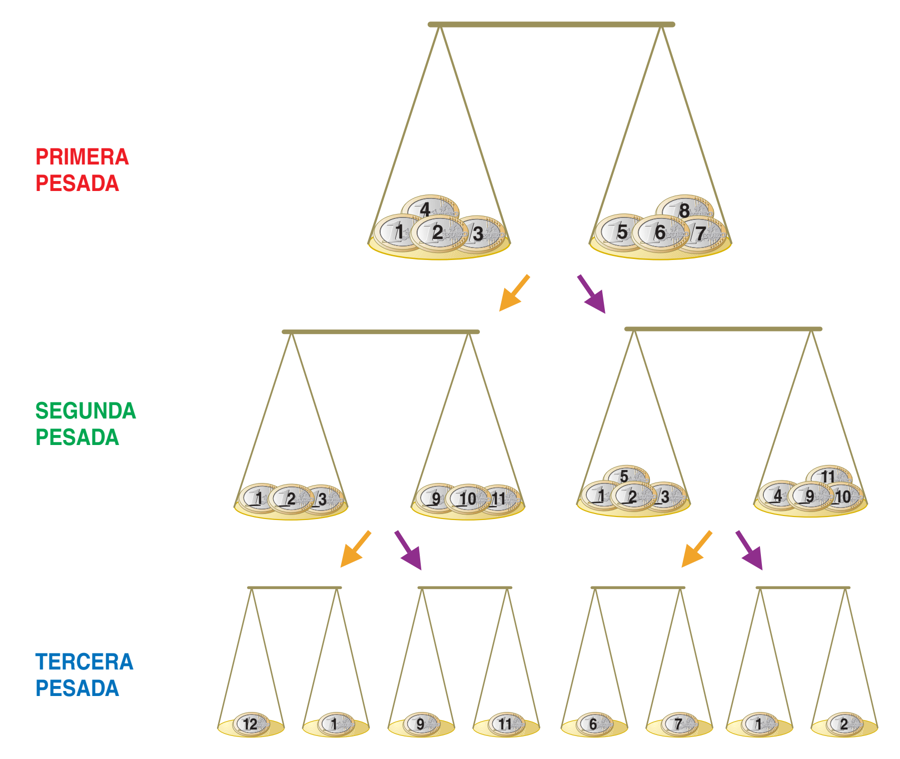
Este mes vamos a analizar un viejo problema de ingenio que los lectores probablemente conocerán. Sin embargo, abordaremos su solución desde un ángulo nuevo, que además nos permitirá ilustrar algunos conceptos de la teoría de la información. El problema consiste en encontrar una moneda falsa entre doce mediante una balanza de dos platillos. La moneda falsa tiene un peso diferente al de las otras, pero no sabemos si es más o menos pesada que éstas. Con estas premisas, debemos encontrar la moneda falsa en sólo tres pesadas.

La solución es bastante complicada y normalmente se llega a ella por prueba y error, o reduciendo el problema a otro más sencillo. Sin embargo, si uno se deja guiar por los principios de la teoría de la información, la solución se construye de forma bastante natural y, sobre todo, sistemática.

Cada pesada tiene tres posibles resultados: que los dos platillos se equilibren, que el derecho pese más que el izquierdo o que sea el izquierdo el más pesado, y cada uno de estos resultados nos proporciona una cierta información sobre las monedas; maximizarla para cualquiera de los tres resultados posibles será la mejor forma de diseñar una pesada. La teoría de la información nos dice que esto se consigue si los tres resultados posibles de la pesada son equiprobables, es decir, si se dan con una probabilidad de 1/3. Este es el principio que guiará en todo momento nuestro diseño de las pesadas: la probabilidad de cada resultado debe ser lo más cercana a 1/3 que podamos.

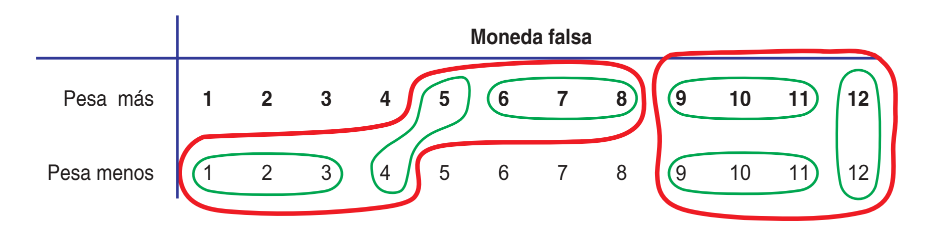
Supongamos que en la primera pesada colocamos un cierto número de monedas en cada platillo (el mismo número en cada uno) y dejamos algunas fuera. El equilibrio entre los platillos se dará sólo si la falsa se encuentra entre las monedas que dejamos fuera de la pesada. Para que esto ocurra con una probabilidad de 1/3, debemos dejar fuera cuatro monedas. Por tanto, en la primera pesada debemos colocar, tal y como se muestra en la figura 1, cuatro monedas en cada platillo, digamos las 1, 2, 3 y 4 en el platillo de la izquierda, y las 5, 6, 7 y 8 en el de la derecha, quedando fuera de la pesada el resto, es decir, las 9, 10, 11 y 12. Con ello aseguramos que los tres resultados posibles de la pesada son equiprobables y que ésta nos proporciona la mayor información posible.

Para entender mejor lo que queremos decir con “la mayor información posible”, conviene analizar el problema investigando cómo cada pesada elimina algunas de las diferentes posibilidades que admite cada situación. En principio, la moneda falsa puede ser cualquiera de las doce, y pesar más o menos que el resto. Por lo tanto, tenemos 24 posibilidades. La primera pesada, tal y como la hemos diseñado siguiendo el principio de máxima información, elimina siempre 16 y deja como posibles sólo 8 de ellas. En el caso en que resulte un equilibrio entre platillos, la moneda falsa debe ser la 9, 10, 11 o 12 y aún no sabemos si es más o menos pesada que el



1. Solución del problema de la moneda falsa. La flecha naranja indica la pesada a realizar si el resultado ha sido el equilibrio entre los platillos, mientras que la flecha morada se aplica si la balanza se ha inclinado hacia la derecha. El caso en el que la balanza se inclina a la izquierda se puede deducir con facilidad de la tabla

resto. Si la balanza se inclina hacia la derecha, entonces sabremos que la moneda falsa es una de las ocho primeras y que si es la 1, 2, 3 o 4, entonces será más ligera que el resto, mientras que si es la 5, 6, 7 u 8, tendrá exceso de peso. En todos los casos, las posibilidades compatibles con cada resultado son siempre ocho. En la figura 2 se representan las 24 posibilidades iniciales y, rodeadas por líneas rojas, las ocho posibilidades compatibles con el resultado de equilibrio y con el de desequilibrio hacia la derecha.



2. Reducción de posibilidades en cada pesada. En un principio hay 24 posibilidades. Las áreas rodeadas por las líneas rojas indican las posibilidades que quedan después de la primera pesada en el caso de equilibrio o de desequilibrio hacia la derecha. Las áreas rodeadas por las líneas verdes indican las posibilidades que quedan después de la segunda pesada

Observe que ésta es la máxima reducción de posibilidades alcanzable con una pesada. Si uno de los resultados eliminara, por ejemplo, 17 posibilidades quedándose sólo con 7, entonces los otros dos serían compatibles con esas 17 posibilidades. Por lo tanto, al menos uno de los resultados sería compatible con 9 o más posibilidades.

La mejor estrategia para el diseño de pesadas es claramente la que consigue la mayor reducción de posibilidades, *para cualquiera de los tres resultados de la pesada*. Lo que acabamos de ver es que esa reducción máxima se consigue cuando los tres resultados son compatibles con el mismo número de posibilidades. Como el número total de posibilidades es 24, cada resultado, en la estrategia óptima, será compatible con un tercio de 24, que es 8. Pero, puesto que la probabilidad de que se dé un resultado no es más que la fracción de posibilidades compatibles con el mismo, vemos que la reducción máxima se consigue siguiendo el principio dictado por la teoría de la información, es decir, haciendo que esas probabilidades sean iguales para los tres resultados.

Para la segunda pesada operamos de la misma forma. El problema es que ahora no es posible conseguir pesadas con resultados equiprobables, ya que el número de posibilidades que quedan es 8, que no es divisible entre 3. Nos podemos acercar si diseñamos pesadas en donde uno de los resultados sea compatible con dos posibilidades, mientras que los otros dos lo sean con tres. En la figura 1 se muestra cómo conseguirlo para dos de los casos que pueden darse después de la primera pesada. Finalmente, cuando sólo quedan dos o tres posibilidades, se puede diseñar una pesada que discierna entre ellas.

En la figura 1 se muestra la solución del problema para cuando los resultados de las pesadas son o bien el equilibrio, o bien el desequilibrio hacia la derecha. La figura 2 no es más que un pequeño esquema de cómo las pesadas van eliminando posibilidades. Las líneas rojas rodean las que quedan después de la primera pesada. No he incluido la reducción a que conduce el desequilibrio hacia la izquierda para no complicar en exceso la figura. De forma similar, la segunda pesada, tal y como está diseñada en la figura 1, reduciría las posibilidades a los conjuntos rodeados por las líneas verdes. Finalmente, la tercera pesada debe diseñarse de modo que sea compatible con una única posibilidad, obteniendo así la respuesta al enigma.

Lo reseñable en este viejo problema es su relación con la teoría de la información. Los seguidores de la sección de *Juegos matemáticos* recordarán que ya utilizamos esta teoría para explicar por qué en los juegos de preguntas sí/no conviene realizar preguntas en donde las dos respuestas sean equiprobables, así como la relación entre este tipo de juegos y la compresión de datos en informática (agosto y septiembre de 2001). Cada pesada en el problema que nos ocupa hoy o cada pregunta en un juego proporcionan una cierta cantidad de información que es igual a la disminución de la incertidumbre. Aunque parece que información e incertidumbre son conceptos subjetivos y difíciles de formalizar matemáticamente, la teoría de la información da una definición precisa y cuantitativa de la incertidumbre asociada a una cierta situación, y, en consecuencia, de la información que proporciona una pregunta o una medición acerca de dicha situación. La incertidumbre de una situación dada deberá estar íntimamente relacionada con el número de posibilidades compatibles con ella. La definición precisa de la que hablábamos nos dice que es proporcional a su logaritmo. En el caso de las monedas y las balanzas, la reducción del número de posibilidades compatibles que tiene lugar tras cada pesada no es más que una reducción de la incertidumbre asociada a las monedas. La cuantificación precisa de esa incertidumbre es lo que nos permite asegurar que las pesadas que proporcionan mayor información son aquellas donde los resultados son equiprobables, que es el principio con el que hemos podido encontrar la solución al problema.

Para terminar, invito a los lectores a generalizar el problema. Si disponemos de n monedas, una de las cuales es falsa, ¿cuál será el mínimo número de pesadas que harán falta para descubrirla? No se trata de una pregunta sencilla y no creo que pueda contestarse con absoluta generalidad. Al menos sí es posible encontrar cotas para ese mínimo número de pesadas. En cualquier caso, tratar de contestar a esta pregunta les servirá para profundizar acerca de las relaciones entre incertidumbre e información.

Juan M. R. Parrondo
parr-km0@zenon.fis.ucm.es

Mark Fischetti

Tarjetas inteligentes

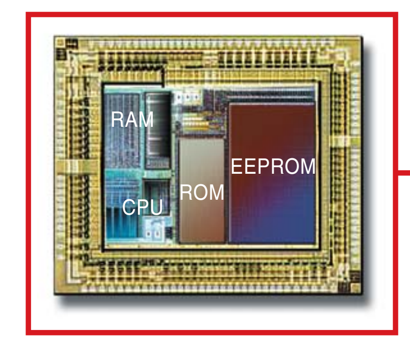
Una tarjeta de crédito inteligente lleva en su interior un microprocesador y un microcircuito de memoria. En la década de 1990 se popularizaron en Europa porque los fraudes con tarjetas de crédito habían crecido mucho y los servicios telefónicos necesarios para comprobar la autorización de las tarjetas no eran baratos. Las tarjetas inteligentes almacenan una información de validación e identificación que los empleados verifican con un simple lector de tarjetas.

En EE.UU. no sentían los usuarios gran necesidad de tarjetas inteligentes. Pero el terrorismo y los robos cometidos en el comercio electrónico por medio de la suplantación han fomentado el ansia de seguridad. Una banda magnética sólo puede almacenar un código de protección simple; cualquiera que disponga de un lector, y sólo valen unos cuantos euros, podrá leerla y reprogramarla. El microprocesador de una tarjeta inteligente genera unas complejas contraseñas que cuesta descifrar y unos marcadores biométricos —las huellas dactilares o los patrones retinianos— que no se falsifican con sencillez. Además, mediante la inserción de una tarjeta inteligente en un lector conectado a un ordenador personal se puede evitar que utilicen éste individuos no autorizados o permitir al propietario que cifre el correo electrónico.

Según Randy Vanderhoof, presidente de Smart Card Alliance, en EE.UU., los pedidos de tarjetas inteligentes se han incrementado en un 45 por ciento durante los últimos doce meses. En cabeza figuran las tarjetas de crédito que refuerzan la seguridad en las transacciones, las de abono de metro y autobús y las de identificación biométricas que controlan el acceso a dormitorios, oficinas y laboratorios. A finales de 2003 el Departamento de Defensa habrá extendido identificaciones inteligentes a cuatro millones de personas. El Departamento de Transportes está desarrollando unas credenciales inteligentes normalizadas para 15 millones de trabajadores federales, estatales, portuarios y aeroportuarios. El Congreso está examinando la Ley de Modernización de los Permisos de Conducir; si se aprueba, exigirá a todos los estados que emitan permisos inteligentes a fin de mejorar la identificación y el descubrimiento de fraudes.

¿Un posible obstáculo? Instituciones y minoristas podrían seguir la pista de los movimientos y compras de empleados, estudiantes y consumidores. ¿Compensa una seguridad más rigurosa la pérdida de privacidad? Puede que el debate se extienda a la par que el uso de las tarjetas inteligentes.

1. LA TARJETA INTELIGENTE contiene un circuito integrado con un procesador (CPU), una memoria dinámica (RAM), una memoria permanente (ROM) y una memoria programable (EEPROM). El circuito integrado está inmerso en epoxia; unos conductores lo conectan a unos contactos eléctricos; éstos, a su vez, rozan los contactos de un lector de tarjetas, los de una antena que comunica por medio de ondas de radio con el lector o los de ambos dispositivos a la vez. El lector alimenta eléctricamente a la tarjeta.





ALAN DANIELS; FUENTE: GEMPLUS (*Circuito integrado y sección transversal*)

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **FABULOSAS REBAJAS:** Los norteamericanos no se han entusiasmado con las tarjetas inteligentes, entre otras cosas, porque no les encontraban una aplicación concreta que resultara "irresistible". Los vendedores de la cadena de almacenes Target están distribuyendo 2,5 millones de tarjetas Visa inteligentes entre sus clientes, a los que además ofrecen lectores gratis. ¿Con qué propósito? Con el de que cada cliente conecte el lector a su ordenador, acceda al sitio de Target en la Red y descargue en la tarjeta unos descuentos que luego hará efectivos en alguna de las tiendas de la cadena. Según los ejecutivos de Target, ya nadie corta cupones. Además, afirman, los clientes salen beneficiados porque la compañía puede adaptar sus promociones a las preferencias de compra de cada uno.

➤ **TARJETAS Y TRIBUNALES:** El alumno de segunda enseñanza Omar Lovell fue detenido en 1998 por haberse saltado, sin pagar, un torniquete del metro de Nueva York. En la vista presentó el registro de su tarjeta MetroCard de estudiante, que demostraba que había pagado. En el año 2000, la acusación empleó los registros de MetroCard para cuestionar la coartada de Marco Valencia en el apaleamiento y robo en diciembre de 1999 del gerente de una tienda de Manhattan. Después, Valencia se declaró culpable.

➤ **COHETE DE BOLSILLO:** Gemplus y Schlumberger-Sema son los primeros proveedores mundiales de tarjetas inteligentes. SSP Litronic, de Reston (Virginia), fabrica tarjetas inteligentes conjuntamente con la Agencia de Seguridad Nacional de EE.UU. La última, apodada Forté, incorpora un microprocesador de 32 bits en vez del omnipresente modelo de 8 bits; la tarjeta Forté realiza cifrados de alto nivel y transferencias rápidas y masivas de información a los lectores de tarjetas. Predice Litronics que la supertarjeta se irá extendiendo poco a poco entre los consumidores.

Contactos
Antena
Circuito integrado
Epoxia
Plástico

2. LA TARJETA GOFRADA contiene sólo 16 dígitos de información. En una de las combinaciones, el dígito 1 identifica al emisor de la tarjeta, los dígitos del 2 al 7 corresponden al número de identificación del banco, del 8 al 15 al número de la cuenta y el 16 es un número de verificación.



3. LA TARJETA DE BANDA MAGNETICA posee tres pistas de almacenamiento paralelas. En uno de los sistemas, contienen, respectivamente, del orden de 80 caracteres de seis bits, 40 caracteres de cuatro bits y 100 caracteres de cuatro bits.

¿Qué llevamos en la cartera?

Tipo de tarjeta	*Característica principal*	*Ejemplo*
Gofrada	Sólo caracteres realzados en el anverso	Las antiguas tarjetas de crédito
Banda magnética	Banda magnética en el reverso, caracteres en el anverso	Tarjeta bancaria
Memoria	Contiene una memoria electrónica	Tarjetas telefónicas de prepago
Inteligente	Contiene una memoria electrónica y un procesador	Tarjetas de identificación biométricas
De contactos	Contactos eléctricos en la superficie externa	
Sin contactos	Antena de radio en el interior	

James Burke

Folies de grandeur

Sentado a la vera del Támesis con la máquina que me procesa los textos, tengo ante mí un recordatorio permanente de que, gracias al hierro y al acero, las máquinas propiciaban en el siglo XIX verdaderos delirios de grandeza: un bello puente de ferrocarril obra de Isambard Kingdom Brunel. Y mientras voy dragando mi pantano mental en busca de entradilla para esta columna, veo pasar una flotando. Una draga, quiero decir.

Lo cual me trae a la memoria el Canal de Suez, delirio de grandeza donde los haya. Desde la época de los romanos, no hubo quien no sintiera la comezón de unir el Mediterráneo con el Mar Rojo. Incluso Napoleón lo intentó, tras invadir Egipto en 1798 (mas renunció cuando su comisión científica le indicó que los 75 centímetros de diferencia entre el nivel de ambos mares lo desaconsejaba). Veinticinco mil *fellahin*, respaldados por un consorcio suizo, italiano, español, holandés y danés, lo lograron en 1869. En las postreras etapas de la construcción se emplearon dragas de succión.

Tanto el canal como la aspiración neumática de la arena habían sido idea francesa. El canal fue planeado por un emprendedor a lo grande, Ferdinand-Marie de Lesseps (que se declaró en bancarrota por un proyecto similar en el istmo de Panamá). La neumática a escala industrial nació cuando los franceses perforaron el primer túnel de ferrocarril a través de los Alpes, bajo el Mont Cenis. La finalidad era unir la Saboya italiana —al norte de las montañas—, a través de Suiza, con el resto de Italia, al sur. Además, los que volvían a casa desde la India, desde Oriente, podrían así tomar el tren en Brindisi, digamos, en vez de tener que circunnavegar España. Pero antes de que el túnel se terminara, se declaró una guerra y los franceses se hicieron con Saboya. En fin, al menos favorecería el turismo.

Ya en 1861, después de tres tediosos años cavando a mano la rocosa cara de los Alpes (a razón de 20 centímetros diarios), el ingeniero jefe, Germain Sommeiller, se propuso acabar la obra antes de que tuviera que irse al otro mundo. Para avanzar más rápido construyó un depósito especial, muy por encima de la entrada del túnel, que vertía un chorro de agua que comprimía aire para los taladros neumáticos; con este procedimiento las obras avanzaron 20 veces más rápido.

El túnel de Mont Cenis sorprendió al mundo casi tanto como el canal de Suez. Los flamantes perforadores neumáticos salieron en una revista a la que echó un vistazo un joven prodigio americano, George Westinghouse, quien convertiría en 1869 aquel ingenio neumático en un freno de aire para los trenes. El aire comprimido, que llenaba los tubos que recorrían los bajos de los vagones, sujetaba unos pistones. Cuando se aliviaba la presión del aire, los pistones se cerraban de golpe, apretando las zapatas contra las ruedas. De esta manera, un tren de 30 metros de largo que circulara a 45 kilómetros por hora podía detenerse en 160 metros.

Tal proeza alentó la idea de programar más trenes con menos separación de lo que antes era aconsejable; a su vez, esto requería una mejor señalización. Motivo por el cual, en 1888, Westinghouse se asoció con un ingenioso croata que estrenaba cada semana una corbata roja y negra y vivía en una habitación de hotel llena de palomas. Era Nicolás Tesla, quien dio con la manera de enviar electricidad a larga distancia por los rieles con el objeto de manejar las señales ferroviarias. Y luego inventó un aparato tan indispensable para el mundo moderno, que pocas veces se repara en él. Tesla envió corriente alterna a dos conjuntos de espiras devanadas en carretes de hierro. Entre las corrientes establecidas había una diferencia de fase de 90 grados. Generaban un campo magnético que rotaba con los sucesivos picos de corriente. El campo impelía a un disco de cobre a girar. Colóquese una correa al disco: se tendrá un motor eléctrico. Durante la Primera Guerra Mundial, perdían la cabeza por contar con este artilugio los capitanes de los descomunales acorazados que se construían por entonces.

Perdían la cabeza por el motor, en primer lugar, porque los barcos metálicos con instalación eléctrica a bordo se lo ponían difícil a las brújulas magnéticas; perderse era fácil. Y en segundo lugar, porque los cañones gigantes de 14 pulgadas, que disparaban proyectiles de 400 kilos a unos 15 kilómetros, poco daño iban a hacer si el barco cabeceaba tanto que no podían darle ni a tres (enemigos) en un burro.

El pequeño motor de Tesla resolvió ambos problemas poniendo a rotar giróscopos de diferentes tamaños. Los había pequeños que marcaban el norte verdadero (una vez rota el giróscopo, se mantiene apuntando a la misma dirección así se conjuren todos los elementos contra el barco); pero también mamotretos de 4000 toneladas, que giraban en el centro del barco para contrarrestar los vaivenes del mar. Y entre unos y otros, los de tamaño mediano, para cada plataforma de cañón. Ahora los acorazados se harían respetar. En su primer lance de combate, el recién estrenado *USS Delaware*, giroestabilizado, derribó a todos y cada uno de los aviones atacantes. En medio de una tormenta.

Concibió este empleo del giróscopo un fabricante de componentes eléctricos de Brooklin, Elmer A. Sperry. Le proporcionó una fortuna. No se crean, convencer a la Marina no fue una travesía por aguas tran-

quilas. Y los riesgos financieros exigieron un temple de equilibrista. Aunque precisamente en la cuerda floja había fracasado Sperry por primera y última vez: tiempo antes, había intentado convencer a P. T. Barnum de que sacara una carretilla giroestabilizada en uno de los números de trapecio de su circo.

La razón más probable de la negativa de Barnum fue la escasa atención que le prestó siempre a la técnica, excepto, fugazmente, durante la década de 1840, los años en que se lanzó al espectáculo y andaba ávido de curiosidades que exhibir. Buscaba entre otras cosas "pulgas amaestradas... muchachos gordos... funambulistas y... máquinas de tricotar". Además, cuando Sperry le propuso lo del giróscopo, Barnum había dejado muy atrás la carretilla (y las pulgas); era ya el empresario de "El mayor espectáculo del mundo", una *troupe* de 800 personas que recorrían durante su gira anual más de 10.000 kilómetros en un tren especial.

De vez en cuando Barnum lo dejaba todo en pos de la difícil sobriedad o, como entre 1851 y 1852, para organizar un viaje por los Estados Unidos y Cuba de la más célebre soprano del mundo, Jenny Lind. En 1844 Lind había actuado por primera vez fuera de Suecia, en Berlín, y su éxito fue tan desmedido que al instante quedó convertida en diva, con sólo 24 años. Un admirador no deseaba más que tocarle la espalda para "ver de dónde le salen las alas" (la llamaban "el ruiseñor de Suecia"). En la vía pública provocaba escenas que no se volverían a ver hasta los Beatles. El Teatro de Su Majestad de Londres encargaba en 1845 una ópera pensada para ella a la otra estrella operística del momento, Giuseppe Verdi. Dos años más tarde Verdi cumplía; la obra era *I Masnadieri*, con Lind en el papel de Amalia. Exito sensacional.

Quizá gracias a eso tuviera Verdi la oportunidad de escribir veintitantos años después la que sería la más popular de todas las óperas: *Aida*. Gobernaba Egipto en aquel tiempo un virrey del Sultán, el bajá Ismail, quien se había empeñado en sus predios en unos proyectos de ingeniería tan costosos, que andaba muy escaso de fondos, tanto, que no le quedó más remedio que vender sus acciones de una empresa que prometía grandes beneficios (precisamente el proyecto para cuya inauguración se encargó *Aida* en un principio). Se pretendía que la ópera, ambientada en el Egipto de los faraones, exaltase el pasado del país sometido a los señores turcos. Sin embargo, no tuvo un gran efecto en lo que a eso se refería, y quizá por lo mucho que se tardó en llegar a un acuerdo con Verdi la partitura se entregó con dos años de retraso. Demasiado para la ocasión que se quería celebrar: la apertura del canal de Suez.

Y aquí acaba esta *folie de grandeur* mía, que una máquina ha propiciado.

Wolfgang Bürger

Un experimento impactante

Encuentro físico: Hicimos de árbitros para los dos equipos rivales. Seis alumnos de los últimos cursos de bachillerato se enfrentaron a seis de sus profesores, que tuvieron el atrevimiento de competir con los jóvenes "lumbreras" de ciencias naturales a la vista de todos. (Bien entendido que los profesores no eran de matemáticas o física, sino de otras asignaturas, de lengua, de geografía o de música.) Para ambos equipos habíamos preparado el mismo montaje experimental: una bola pesada de hierro colgaba de una cuerda de dos metros y pico de largo. Justo debajo del gancho del techo pusimos una botella de vino vacía. La longitud de la cuerda medía unos centímetros más que la distancia del techo a la boca de la botella; para hacer sitio a la botella, pues, teníamos que separar el péndulo de su posición vertical de reposo. Si se soltase el péndulo sin impulso alguno, tendría que caer la botella a la primera. Que esto es posible lo puede ver cualquiera sin realizar el experimento. Nosotros propusimos un problema más difícil: "¡Poned en movimiento vuestro péndulo" —pedimos a los equipos— "de manera que a la ida la bola pase justo al lado de la botella, pero a la vuelta la tire!".

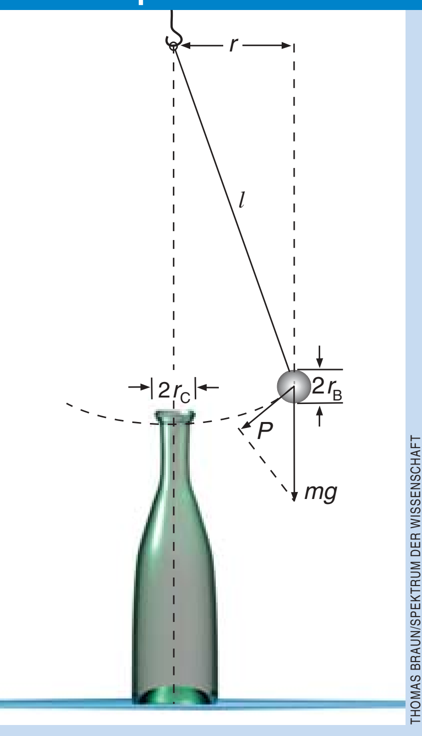
Experimentos: Ambos equipos se aplicaron con ahínco. Habíamos instalado unos micrófonos cerca del péndulo para que el público y nosotros mismos pudiéramos seguir las discusiones internas. Así nos enteramos de que ambos grupos se dieron cuenta enseguida del problema: el camino de vuelta de la bola era una imagen simétrica del de ida. Si en uno de los recorridos evitaba el centro, también lo haría en el otro. Durante el breve plazo de reflexión, ambos equipos buscaron febrilmente un efecto físico que rompiera dicha simetría.

El primer candidato era el efecto de la resistencia del aire en la bola y la cuerda, que frena el movimiento del péndulo. Para grandes intervalos de tiempo, por ejemplo en un péndulo de Foucault, tampoco se puede ignorar la fricción en el punto de sujeción de la cuerda. Un péndulo gravitatorio que se mueve por su cuenta acaba parándose más tarde o más temprano. ¿Puede la fricción del aire frenar una bola, que de ida casi bese la botella, y la roce tanto a la vuelta que pueda derribarla? Para descartarlo de entrada, escogimos bolas muy pesadas que en una oscilación no perdieran impulso perceptible. Los equipos se esforzaron en vano du-

La molesta simetría del movimiento pendular

Momento angular: Para nuestro propósito, basta con tener en cuenta la proyección del movimiento pendular de la bola sobre un plano horizontal es decir, la sombra que proyecta la bola en el suelo al incidir sobre ella luz proveniente del techo. (No hace falta considerar su movimiento completo.) Fijemos, dentro de este plano, el origen de nuestro sistema de coordenadas en el punto de equilibrio del péndulo (más exactamente: en la sombra de este punto). El movimiento de la sombra del péndulo es el mismo que el de una masa puntual en el plano bajo una fuerza atractiva que se halle siempre orientada hacia el origen. En este tipo de movimientos el momento angular $L = mr^2 \dot{\varphi}$ permanece inalterable (m masa del péndulo, r distancia hasta el origen de coordenadas, $\dot{\varphi}$ velocidad angular).

Para pequeñas desviaciones, el movimiento del péndulo se descompone en dos oscilaciones independientes —según el eje x y el eje y— desfasadas 90°,



THOMAS BRAUN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

de frecuencia angular $\omega = \sqrt{g/l}$ dependiente de la longitud del péndulo l (g es la aceleración gravitatoria). Resulta una elipse con centro en el origen de coordenadas. A diferencia del movimiento planetario kepleriano, el centro de fuerzas no está en un foco, sino en el centro de la elipse.

Para simplificar, ponemos en movimiento la bola en uno de los cuatro vértices de la elipse, a una distancia a (semieje mayor) del centro e impulsándola en dirección tangencial con una velocidad v_a. (Cualquier otra condición inicial se puede reducir a este caso con algo de cálculo.) Su movimiento obedecerá las siguientes ecuaciones

$$x = b \text{ sen } \omega t$$
$$y = -a \cos \omega t$$

De las condiciones iniciales resulta que $b = v_a/\omega = v_a\sqrt{l/g}$. La sombra de la bola traza una elipse de ecuación $x^2/b^2 + y^2/a^2 = 1$. Si, con la ayuda del aire, la bola ha de pasar sin tocar la

rante algún tiempo en dirigir el péndulo muy cerca de la botella; mas, si daban en ella, era ya en el recorrido de ida. De haber optado por bolas de poliuretano expandido en vez de las pesadas de hierro, habrían conseguido su propósito. Pero bajo las condiciones dadas, la resistencia del aire no podía ser la solución.

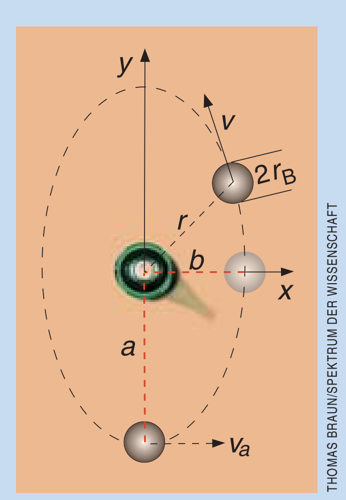
Los equipos consideraron luego el efecto Magnus. ¿Podía haber algo que resultase más familiar a los jugadores de tenis que había entre nuestros "investigadores" que poner en movimiento una bola con efecto, es decir, propinarle un giro tal que la "sustentación" aerodinámica la acelere perpendicularmente a su dirección de vuelo? El vuelo de la pelota de golf se alarga gracias a un efecto de giro alrededor de un eje horizontal perpendicular a la trayectoria. En el tenis o en el ping pong ese efecto sirve sobre todo para engañar al contrario falseando la trayectoria de la pelota. En nuestro juego, el giro en el aire de la bola alrededor de la dirección de la cuerda del péndulo induce una "fuerza de sustentación" que, según el sentido de giro, se dirigirá hacia adentro —o sea, hacia la botella— o hacia fuera. Así las cosas, la fuerza debida al efecto Magnus empujará la bola hacia la botella si rota en el mismo sentido en que rodea a la botella. El equipo que descubrió el efecto se puso a retorcer la cuerda, con la esperanza de que, al deshacerse la torsión, impartiese un giro rápido a la bola. Esto les salió bastante bien, y hasta el razonamiento teórico en que se basaron era correcto. Pero la realización práctica resultó un fiasco: la intensidad del efecto Magnus, medida por la fuerza de recuperación del péndulo (la componente del peso perpendicular a la cuerda), era demasiado débil para las velocidades que se alcanzaban


JOHANNES POPPE/SDW

Conseguir que la bola oscile a un hilo de distancia de la botella exige mucho tino. Pero no sirve de nada...

botella en el recorrido de ida y derribarla en el de vuelta, la distancia más pequeña b tendrá que ser algo mayor de ida y algo menor de vuelta que d, la suma del radio de la bola del péndulo y del cuello de la botella: $d = r_B + r_C$.

Para que las fuerzas de fricción reduzcan sensiblemente la magnitud b en el corto camino entre los dos pases junto a la botella, deberá recorrerse una elipse lo más estrecha posible ($b \ll a$). Se hace a todo lo grande que se pueda y v_a sólo poco mayor que la velocidad mínima $(v_a)_{min} = \omega d$ necesaria para la que la bola pasa justo sin tocar la botella en el recorrido de ida. Esa velocidad mínima es de unos 12,3 cm/s o 0,44 km/h para $l = 2$ m, $g = 10$ m/s^2, $r_C = 1{,}5$ cm y $r_B = 4$ cm. No es fácil atinar con ese valor.



Resistencia del aire: Comparemos las dos fuerzas implicadas: la resistencia del aire es $R = c_R A \rho_A v^2/2$; donde $c_R < 0{,}5$ es el coeficiente de resistencia y $A = \pi r_B^2$ la sección transversal de la bola que se opone al viento (ρ_A es la densidad del aire, v la velocidad, r_B el radio de la bola). La fuerza de reposición, que tira del péndulo hacia el centro, es $P = mgr/l$ ($m = (4/3)\pi r_B^3 \rho_B$ indica la masa de la bola; ρ_B, su densidad). Una estimación cuidadosa de la razón R/P para el movimiento de la bola del péndulo sobre una trayectoria elíptica angosta proporciona un valor claramente menor que 0,01. Así que la resistencia del aire no puede resolver el problema.

Efecto Magnus: Una bola que se mueva a velocidad $\vec{v}$, dotada de una rotación en torno a su propio eje con una velocidad angular Ω, experimentará, a causa de la fricción con el aire, una fuerza de sustentación S que se orientará perpendicularmente al vector $\vec{v}$ y al eje de rotación de la bola. Esta fuerza se puede representar de manera similar a la resistencia R, substituyendo el coeficiente de resistencia c_R por un coeficiente de sustentación c_S. En la mecánica del tenis hay fórmulas empíricas aproximadas para esa dependencia de la razón de velocidades $v/(r_B\Omega)$. Nos extenderíamos demasiado si las examinásemos aquí. Mas para los valores de Ω alcanzados, la fuerza debida al efecto Magnus es aún menor que la resistencia y resuelve peor el problema propuesto.

en el experimento. ¡Verdaderamente una pena! El plazo de reflexión, por desgracia, se acabó. Había llegado el turno de los árbitros.

La teoría del péndulo gravitatorio: ¿Cómo se puede entender que una bola que pasa junto a la botella la evite en adelante, suponiendo que ninguna fuerza (la resistencia del aire o el efecto Magnus) influya en el movimiento? Un péndulo gravitatorio que cuelgue de un punto no sólo oscila en un plano vertical; su cuerda también trazará un cono circular en el espacio, mientras la bola describe una trayectoria circular. Son los dos movimientos típicos de una bola de péndulo; cualquier otro movimiento imaginable es una combinación de ambos. Mientras no intervenga la fricción, ciertas propiedades del movimiento permanecerán invariantes en el tiempo y lo caracterizarán en adelante. Son éstas la energía (suma de la energía cinética y la energía potencial de la bola en el campo gravitatorio), para la oscilación pendular en el plano, y el momento angular en torno al eje vertical que pasa por el punto de suspensión, para el movimiento cónico. Quien quiera lanzar la bola de manera que a la ida no toque la botella, deberá darle un momento angular adecuado para el recorrido. Pero ese mismo momento evitará que en el viaje de vuelta se acerque a la botella. Para un péndulo con momento angular, la posición de reposo en el centro resulta inalcanzable.

Un truco ilegal: Aparentemente, sólo con física no se consigue el objetivo. Pero el problema propuesto se puede resolver con un truco. Una cuerda de cierto grosor se acorta al retorcerla. La retorcimos hasta el punto de que, a la ida, el péndulo pasase justo por encima de la botella en su oscilación en el plano medio. A la vuelta, la cuerda ya se había rectificado tanto que la bola derribó la botella. Como ya comenté, uno de los equipos retorció la cuerda; lo hizo, sin embargo, para sacar provecho de su fuerza de recuperación elástica. Por un momento creímos que habían dado en el clavo. Pero los jóvenes no tenían tanta malicia como nosotros.

De Atenas a Alejandría

Ciencia helenística

DIOCLES OF CARYSTUS. A COLLECTION OF THE FRAGMENTS WITH TRANSLATION AND COMMENTARY, por Philip J. Van der Eijk. Brill; Leiden, 2000.

APOLLONIUS OF PERGA'S CONICA. TEXT, CONTEXT, SUBTEXT, por Michael N. Fried y Sabetai Unguru; Brill; Leiden, 2001.

SURVEYING INSTRUMENTS OF GREECE AND ROME, por M. J. T. Lewis. Cambridge University Press. Cambridge, 2001.

THERIAKA Y ALEXIPHARMAKA DE NICANDRO. Alain Touwaide *et alii*. Manuel Moleiro editor. Barcelona.

AMMONIUS HERMEAE. COMMENTARIA IN QUINQUE VOCES PORPHYRII. Traducción de Pomponius Gauricus. **IN ARISTOTELIS CATEGORIAS.** Traducción de Ioannes Baptista Rasarius. (Con los añadidos de Johannes Philopponus.) Fromann-Holzboog; Stuttgart-Bad Cannstatt, 2002.

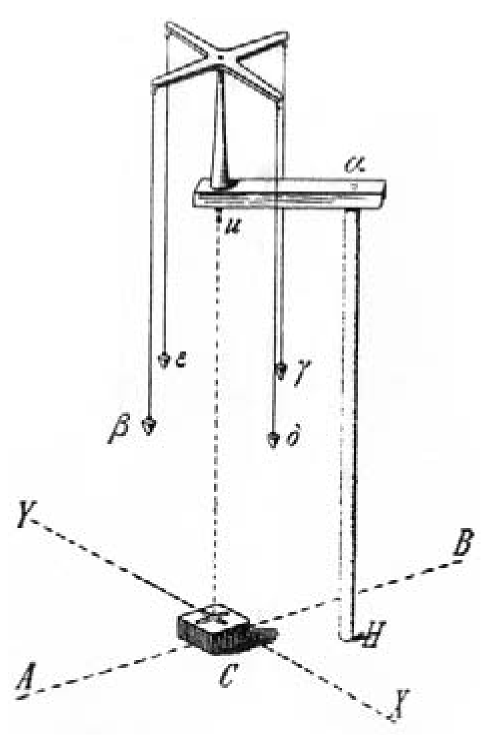
Pese a haber sido la recuperación del Helenismo uno de los principales éxitos del Renacimiento, con su indiscutible influencia en lo que se llamaría revolución científica, muy pocos tienen hoy algo más que una idea borrosa del significado de ese período en la historia del saber. Si, por un lado, prolonga la labor hercúlea de Aristóteles e Hipócrates (*Diocles of Carystus*), por otro apuntala y elabora los fundamentos matemáticos de toda ciencia (*Apollonius of Perga's Conica*).

Caristo está en la Eubea griega. Allí nació, en torno al siglo IV antes de Cristo, el que los atenienses reputarían, por la profundidad y extensión de sus conocimientos médicos, "joven Hipócrates". La obra de Diocles gozó de amplia difusión en el mundo helenístico. En particular, mereció el reconocimiento de Galeno, quien, tras su huella, exigía una buena preparación filosófica para el ejercicio del arte médico.

Diocles defendía, siguiendo la pauta aristotélica, una visión teleológica de la naturaleza. Siguiendo a Empédocles, sostenía que el embrión se formaba por mezcla de los fluidos seminales del varón y de la mujer. Siguiendo a Hipócrates, desarrolló una fisiología basada en los cuatro elementos (fuego, aire, agua y tierra), cuyo equilibrio permitía mantenerse en buena salud. En su estela, se ocupó de la dieta y aconsejó la experiencia práctica y la observación para un diagnóstico y pronóstico acertados. A Diocles debemos la primera anatomía y, quizás, el primer tratado de materia médica, que, como el resto de sus escritos, se han perdido. Sólo nos han llegado testimonios indirectos (a través de Galeno, Celso, Oribasio, Sorano, Celio Aureliano, Ateneo de Naucratis o Plinio el Viejo, entre otros) que se recogen en esta edición crítica, que remoza, con nueva documentación, la benemérita de Max Wellmann (*Die Fragmente der sikelischen Ärzte Philistion, Akron und des Diokles von Karystos*), publicada hace un siglo.

Más profundo es el cambio que Michael N. Fried y Sabetai Unguru proponen en la interpretación de las *Cónicas* de Apolonio. Hasta ahora se venía bebiendo de *Die Lehre von den Kegelschnitten im Altertum*, un trabajo meritorio de H. G. Zeuthen, aparecido en el ya lejano 1886. Prescinden de las transmutaciones algebraicas para ceñirse al texto escueto de Apolonio y a los estrictamente contemporáneos.

Forma Apolonio con Euclides y Arquímedes el triunvirato de la matemática helenística. Sus *Cónicas* constituyen el apogeo del corpus griego. Pero sabemos muy poco de la vida de su autor, el geómetra por antonomasia. Nacido en torno al 240 a.C., desarrolló su actividad en Efeso, Pérgamo y Alejandría, ciudad esta última donde compuso la versión inicial de las *Cónicas*. Suyas son también *Sección de una razón, Sección de un área, Sección determinada, Tangentes* y alguna más. De éstas sólo nos ha llegado, y en árabe, *Sección de una razón*. Se le atribuye, además, la demostración de que, si los sólidos se inscriben en una esfera, la superficie de los mismos se halla en idéntica razón que sus volúmenes.



1. Reconstrucción de la groma romana por A. Schulten

La suerte de las *Cónicas* ha ido paralela al decurso de la evolución de la matemática precartesiana. Recuperado su estudio por los árabes desde el siglo nono, también en el Medievo latino se manejan por lo menos desde la segunda mitad del siglo XIII. Witelo se muestra familiarizado con las proposiciones de los libros I y II en su *Perspectiva*, a través de una traducción plausible de Guillermo de Moerbeke. Se trata,

empero, de un conocimiento parcial. Tampoco es completa la traducción clásica de Federigo Commandino, impresa en 1566, que se limita a los cuatro libros primeros. Hasta el siglo XVIII no se dispondrá de los tres libros siguientes. El octavo parece perdido para siempre.

Pese a su división octopartita, Apolonio contempla las *Cónicas* como un solo libro. Comienza por los elementos, vale decir, por los fundamentos de la geometría, mediante definiciones y proposiciones sobre la parábola, hipérbola, elipse y secciones. A ellos dedica los libros I-III. Trenza el IV en torno a la cuestión: ¿cuántos puntos puede pasar una sección cónica? Se polemiza si debe interpretarse el V como un tratamiento de las normales a las secciones cónicas que conducen a la ecuación de la evoluta. En el sexto se abordan igualdad y semejanza de secciones cónicas, para exponer, en el siguiente, los "teoremas diorísmicos".

De la teoría a la práctica (*Surveying Instruments of Greece and Rome*). Con un reduccionismo simplificador solemos asociar las grandes obras públicas a la *pax romana*: calzadas que cortan países con la rectitud de una flecha, cabezas de túneles que convergen a notable profundidad o acueductos cuyo gradiente promedio se cifra en 1 en 8000 para 25 kilómetros. Los romanos, sin embargo, no partían de la nada. Pese a su terreno accidentado y fraccionarse en unidades políticas muy pequeñas, los griegos habían resuelto complejos problemas ingenieriles. Tras las conquistas de Alejandro, la cuenca mediterránea oriental sufre una profunda transformación que tiene en Alejandría su expresión científica y técnica. La lengua común facilita el desarrollo de una de las disciplinas mixtas más apremiantes: la topografía, entendida en sentido amplio. (Roma se adueña de esa región entre el 146 y el 31 a.C.)

Cuatro categorías de profesionales intervenían en los distintos aspectos de la obra pública, lo mismo entre los griegos que entre los romanos. En primer lugar, el que se ocupaba de la medición del suelo (*geometres* o *geodaistes* en griego, *finitor, mensor, agrimensor* o *gromaticus* en latín). Delimitaba la extensión de las propiedades rurales y se encargaba del trazado de las calles. Su trabajo nos ha llegado compendiado en el *Corpus Agrimensorum*. Correspondía al corógrafo o geógrafo, así se le llamaba, levantar

QUIMICA VERDE

GREEN PLASTICS. AN INTRODUCTION TO THE NEW SCIENCE OF BIODEGRADABLE PLASTICS, por Eugene S. Stevens. Princeton University Press; Princeton, 2002.

El calificativo "verde" ha adquirido desde hace un buen tiempo en el lenguaje común una connotación de respeto al medio, o "ecológico". El Diccionario de la Real Academia Española (2001) recoge este significado en la 15.ª acepción de la palabra, pero sólo aplicada a los miembros de los partidos ecologistas.

La química no se ha mostrado ajena a este nuevo significado. Desde unos años a esta parte se habla de la "química verde", que estudia el conjunto de productos, procesos o reacciones en los que se procura respetar los principios del desarrollo sostenible: minimización de residuos, reciclaje, empleo escaso o nulo de disolventes, reducción de la energía invertida en el proceso, evitar la generación de contaminación, etcétera.

Se han desarrollado así detergentes sin fosfatos, cosméticos naturales o pinturas "verdes" de cualquier color. Empiezan ahora a aparecer no sólo productos —sustancias que se consumen— sino también materiales —que perduran— verdes. El libro que nos ocupa trata de los plásticos, materiales decisivos por su versatilidad, gran producción y amplísima gama de familias. Y se centra en una de las variedades emergentes de los mismos: los bioplásticos o plásticos biodegradables.

El libro se dirige al profano, o al estudiante de primeros cursos universitarios de cualquier disciplina, sin especialización en química ni en materiales. Su lenguaje es simple y comprensible, descriptivo, sin ecuaciones, con sólo las mínimas fórmulas químicas y sin reacciones. El texto consigue ser una breve introducción, escrita de primera mano por un experto, que estimula al lector a profundizar según sus intereses.

La primera parte es una introducción a los plásticos como polímeros, su estructura, sus características físicas y los principales procesos actuales para su tratamiento y disposición en el medio. La segunda parte se dedica específicamente a los biopolímeros y bioplásticos. Se describen someramente en primer lugar los principales biopolímeros naturales. En un breve capítulo analiza con detalle la evolución histórica de los bioplásticos, desde las cucharas y cuencos de cuerno al colodión, el celuloide, el celofán o la seda viscosa. El autor describe después los avances recientes en el diseño y fabricación de nuevos biopolímeros, bioplásticos y materiales compuestos basados en una amplia variedad de materias primas: almidón, quitina, proteínas de soja, gelatina, caseína, poliésteres naturales, derivados del ácido láctico, polímeros derivados de triglicéridos de diversas procedencias.

Se dedica un capítulo a analizar las oportunidades de la industria de fabricación de estos materiales. Pone el énfasis en la compatibilidad de la fabricación de bioplásticos con las tendencias ambientales actuales: el uso de materias primas procedentes de la biomasa renovable; el bajo impacto ambiental de las industrias de fabricación de los bioplásticos; y su biodegradabilidad natural. Un último capítulo traza una perspectiva del futuro de los bioplásticos, y destaca la importancia de que gobiernos e instituciones favorezcan su implantación por vía legislativa. Asimismo, anima al sector privado a una acción decidida a favor de los bioplásticos, vinculándolos a tres conceptos asumidos ya por buena parte de la industria química: la firma del Compromiso de Progreso ("Responsible Care"), el compromiso de las empresas líderes del sector por el desarrollo sostenible expresado en las normas ISO 14000; y el desarrollo y aplicación de los principios de la ecología industrial, la nueva disciplina que sistematiza y da forma aplicable a conceptos antes dispersos.

Termina el libro con un apéndice —de especial interés para los lectores de la clásica sección de "Taller y Laboratorio"— sobre cómo fabricar uno mismo diversos bioplásticos. Un glosario, la bibliografía y los índices cierran el libro.

—CLAUDI MANS

MUNDO SUBMARINO

The Eternal Darkness. A Personal History of Deep-sea Exploration, por Robert D. Ballard y W. Hively Princeton University Press; Princeton, 2000.

Robert D. Ballard es una verdadera autoridad en la exploración submarina, a la que ha dedicado prácticamente toda su vida. De joven, la afición le llevó a seguir los estudios hasta alcanzar el grado de doctor en geología marina y geofísica. En el ámbito profesional destacan el haber sido miembro de una comisión al respecto formada por la Marina de guerra de los EE.UU., luego director del centro de exploración marina de la Institución Oceaográfica Woods Hole, de Massachusetts, y finalmente presidente del Instituto de Exploración, de Mystic, en Connecticut. En otras palabras, Ballard ha dirigido o participado en más de 110 expediciones submarinas, siendo un testigo de excepción de esa actividad, cuyos recuerdos y conocimientos refleja en esta obra que comentamos.

Con una redacción amena, fluida y muy agradable, Ballard recuerda someramente los inicios y el progreso de la inmersión, citando, como precedentes, desde el caso de Alejandro Magno hasta la aplicación de la campana de buceo y los trajes de buzo, aunque la obra se centra decididamente en la etapa actual, que iniciaron Charles William Beebe y Otis Barton, con la invención y utilización de la batisfera, de dos tripulantes, en 1930. Y con el propósito de ambientar al lector, Ballard presenta una serie de datos poco conocidos del mundo submarino y sin olvidar en absoluto la indicación de las peculiaridades de las especies que viven en las aguas abisales.

Sin embargo, la mayor parte del texto se centra en la explicación de las características de los medios empleados en investigaciones científicas y, algunas veces, en operaciones de localización y estudio de naves hundidas, incluyendo las de la puesta a flote, como es el caso del *Titanic*, aportando un comentario muy válido sobre las vicisitudes de cada actuación y las virtudes, la problemática y las limitaciones de los medios empleados. Así indica que los suspendidos de un cable empleaban un tiempo excesivo en las fases de inmersión y emersión, adoleciendo además de las dificultades de movilidad en el fondo. Augusto Piccard proporcionó un notable avance con los batiscafos —*FNRS2*, *FNRS3* y *Trieste*— que abrieron el camino a la era de los vehículos tripulados y dotados de movilidad. En 1960, el *Trieste* alcanzó el fondo de la fosa Challenger, situada en el Pacífico, a unos 10.912 m bajo la superficie del agua, y la mayor de las existentes. Aquí recuerda también el papel de Jacques Cousteau y sus meritorias aportaciones.

El inconveniente de esa etapa fue la limitación de la permanencia de los tripulantes bajo el agua y el tamaño excesivo de los vehículos, y aunque el progreso puso en servicio unidades más prácticas, la realidad es que la aplicación de la fotografía submarina y del vídeo, con transmisión instantánea de las imágenes, y el uso de medios de control remoto han abierto una nueva etapa a la investigación submarina. El resultado es el uso de vehículos no tripulados, gobernados por equipos de científicos de muchas áreas de conocimiento distintas, desde centros situados en tierra firme y en cualquier parte del mundo, o debidamente conectados a ellos, siendo éste el camino del futuro, pues las experiencias realizadas, que el autor detalla, han demostrado ya su excelencia y viabilidad.

El texto contiene un capítulo de bibliografía, que ocupa 60 páginas completas. —Laureano Carbonell

mapas de regiones, provincias o incluso del mundo entero conocido. Al menos en teoría, esto implicaba establecer latitudes e, indirectamente, longitudes por una combinación de métodos astronómicos y terrestres. A una tercera categoría pertenecía el topógrafo militar (*mensor*), cuyo trabajo se desenvolvía allí donde resultaba difícil acometer mediciones directas, esto es, en presencia del enemigo. Determinaba la altura de la muralla de una ciudad para preparar las escalas de asedio y la anchura de un río para tender pontones. Por último, el ingeniero jefe de obra pública civil (*liberator*), responsable de la construcción de calzadas, acueductos, canales, túneles y puertos.

Para medir distancias, los griegos tenían la cuerda como unidad de longitud. Hecha de esparto o junco trenzado, equivalía a 100 codos, que se dividían en ocho nodos (*hammata*). La unidad de área era el *aroura*, una cuerda al cuadrado. No se avanzó mucho más allá de la geometría euclídea elemental, en particular de las semejanzas de triángulos. Si el *agrimensor* se servía de la groma, instrumento romano por excelencia, otras tareas sólo podían abordarse con la ayuda de la observación astronómica y la dioptra. La groma, quizá de origen griego, se empleaba para trazar rectas y ángulos rectos de las calzadas, reticular los rectángulos urbanos, asentar fortalezas militares y, sobre todo, deslindar las propiedades. Estaba constituida por una cruz horizontal con brazos en ángulo recto y apoyada sobre un vástago vertical. Del extremo de cada uno de los cuatro brazos de la cruz pendía una cuerda plomada. El técnico observaba a través de un par de cuerdas para proyectar una línea recta, y a través del otro para tender un ángulo recto. Para trabajos de nivelación se recurría al corobates, recuerda Vitrubio. Cuando había que medir ángulos en distintos planos, se utilizaba la dioptra, en torno a la cual escribió un tratado fundamental Herón, figura señera de la ciencia alejandrina; en su forma más sencilla constaba de un disco, grabado con dos diámetros en ángulo recto; portaba una alidada o una barra de visión similar que pivotaba sobre su centro.

Otra señal distintiva de la ciencia helenística, que el Renacimiento se esforzó por resaltar, fue su aportación a la farmacología (*Theriaka y Alexipharmaka de Nicandro*). El texto de referencia saca a la luz una de las joyas bibliográficas de la Biblioteca Nacional de Francia, el manuscrito *Supplément grec 247*, ilustrado. Contiene dos poemas didácticos del alejandrino Nicandro de Colofón (siglo II a.C.): uno, los *Theriaka*, consagrado a las mordeduras de animales venenosos y a sus remedios; el otro, los *Alexipharmaka*, trata de los venenos y antídotos.

En 958 versos, los *Theriaka* exponen cuanto conviene saber en caso

MODELIZACION

MODÉLISATION COGNITIVE ET RÉSOLUTION DE PROBLÈMES, por Guy Caplat. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; Laussane, 2002.

En nuestra época, donde la información es omnipresente y donde las empresas tienen la necesidad de capitalizar sus procedimientos (*know how*) y gestionar su conocimiento, estas cuestiones son de una importancia decisiva. Se plantea la necesidad de disponer de todos estos recursos a través de un proceso de automatización. La automatización de un proceso de resolución de problemas necesita de un análisis previo y un posterior proceso de modelización, además de una traducción en un programa informático, de los conocimientos utilizados.

El contenido del libro se plantea dar respuesta a preguntas como: ¿Cuáles son la naturaleza y el papel de los conocimientos utilizados por los humanos en el marco de una actividad de resolución de problemas?, ¿cuál es la diferencia entre información y conocimiento?, ¿en qué medida el conocimiento es modelizable?, ¿cuáles son los formalismos que permiten la modelización?, ¿cómo traducir los conocimientos humanos en programas informáticos?, ¿cómo controlar este proceso?

En el contexto de la inteligencia artificial y compartiendo frontera con el área de las ciencias cognitivas, se enmarca el contenido de este libro, que se propone analizar los conocimientos puestos en juego, en el marco de la concepción, de la interpretación y de la traducción en procesos automáticos de la resolución de problemas.

El autor comienza presentando su concepto operativo de conocimiento y la forma en que se pretende modelizar.

1. El conocimiento posee un papel de mediación como realidad percibida y subjetiva, y de conocimiento operacional, que permita dirigir nuestras acciones desde el presente, anticipándose a las consecuencias. Según este punto de vista, la noción de conocimiento está ligada a la de conceptualización y a los mecanismos para conducir las acciones racionales.

2. La modelización de conocimientos necesita un marco formal. Este marco viene constituido por principios conceptuales que son reflejo de compromisos ontológicos que el usuario acepta. De esta forma, presentar un modelo bajo un formalismo dado induce una adhesión a los principios sobre los cuales reposan sus reglas de estructuración y de composición; a cambio, le ofrece a sus usuarios un lenguaje común.

En el primer capítulo, "Sobre la pista del conocimiento", se introduce la terminología. Se presentan los errores de las primeras aplicaciones de tipo "sistema experto". Se abordan seguidamente diferentes aproximaciones a la resolución de problemas como la reutilización de casos, el razonamiento analógico, la aproximación simbólica por redes neuromiméticas, la resolución distribuida y los algoritmos genéticos. Se introduce, en este marco de la resolución automática de problemas, la noción de un modelo cognitivo que contempla, por un lado, la determinación de los datos y procesos de resolución y, por otro lado, una representación codificada en un lenguaje de programación ejecutable. La aproximación de resolución descrita es, por tanto, cognitivista.

En el capítulo segundo, "Conocimiento de dominio", se expone cómo el proceso de modelización descansa sobre tres nociones fundamentales: el concepto, la relación y la semántica. El concepto es abordado desde aproximaciones extensionales e intensionales; bajo la primera, el concepto es considerado una abstracción construida a partir de un conjunto de ítems identificados explícitamente. La noción de aproximación intensional se centra en la noción de propiedad: los conceptos corresponden a reagrupamientos de propiedades elementales sin referencia particular a los objetos de dominio.

Estos conceptos se estructuran con la ayuda de relaciones, entre las que se distinguen la relación de especialización, las diferentes relaciones de composición y la relación genérica descriptiva de dependencia mutua. La ultima sección trata de la representación de la semántica, incidiendo en la importancia de la interpretación de un modelo de dominio.

El capítulo tercero se interesa por los conocimientos necesarios en los procesos de resolución de problemas, que tienen naturaleza variada: desde hechos conocidos a procedimientos rigurosos, leyes y teorías, saberes compartidos, y, al mismo tiempo, creencias sujetas a revisión, razonamiento aproximado y heurísticas de carácter personal.

El diseño de un proceso de resolución de problemas se encuentra en permanente estado de equilibrio inestable: una estrategia conduce a coordinar las acciones de resolución en un plan global, receptivo a variaciones del contexto. Las tensiones determinismo/oportunismo, conocimiento declarativo/procedural son, por tanto, puntos claves tratados en este capítulo. La ultima sección, la más importante del capítulo, se propone definir un modelo de tarea, siguiendo una perspectiva teleológica que conduzca a una propuesta global para la definición de una heurística de resolución. El modelo de tarea que se propone es de tipo inferencial, que detalla un modo de resolución de problemas en términos de flujos de conocimiento.

El último capítulo, "Concepción de bases de conocimiento", trata de las aproximaciones metodológicas necesarias para la concepción de aplicaciones de tipo "bases de conocimiento". El libro concluye exponiendo los principios del enfoque constructivista de elaboración del modelo cognitivo desarrollado. El autor analiza los problemas que su metodología no es capaz de resolver, y presenta las ventajas de control y validación que el modelo cognitivo aporta en el diseño de acciones de producción. Su trabajo es riguroso y completo, y aporta algunas ideas originales al campo de la inteligencia artificial extraídas desde el área de las ciencias cognitivas.

—JUAN M. CORCHADO

de mordedura o picadura de animales ponzoñosos. Lo primero, de qué animal se trata (musarañas, serpientes, lagartos, peces, escorpiones y arañas). Según su naturaleza, así será su veneno. Por su comportamiento llegaremos a identificar al agresor y, si no lo advertimos, por los síntomas provocados. Una vez determinado el animal y observada la patología, el médico podía recetar el fármaco indicado. Galeno, siglos más tarde, reelaborará y fijará de una manera sistemática la correspondencia entre lesión y remedio. En el intervalo apareció la triaca de Andrómaco, preparación medicamentosa de larga historia, entre cuyos ingredientes principales se encontraba la carne de víbora.

Además de los venenos absorbidos por vía intracutánea, había que curar los absorbidos por vía oral. Constituyen éstos el tema central de los *Alexipharmaka*, poema de 630 versos. Los cifra el autor en veintiuno y proceden de los tres reinos. Se aprecia aquí, sin embargo, una mayor estructuración en la descripción física de la solución en la que el veneno se mezclaba, cuadro clínico de los síntomas que siguen a la intoxicación y, por fin, terapia correspondiente.

Desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia, Alejandría baña el Renacimiento de luz neoplatónica (*Ammonius Hermeae. Commentaria in quinque voces Porphyrii. In Aristotelis categorias*). Ammonio, la figura más importante del Neoplatonismo alejandrino, vivió entre el siglo V y el VI. Hijo del filósofo Hermías de Alejandría, comentarista del *Fedro*, a la muerte de su padre se trasladó a Atenas, donde estudió con Proclo. (El Neoplatonismo se proponía reconciliar Aristóteles con Platón, en una suerte de hilemorfismo peripatético que admitiera la teoría platónica de las formas.) Ammonio se interesó por las matemáticas y la astronomía. A su vuelta a Alejandría fue maestro, entre otros, de Damascio, Simplicio y Asclepio de Tralles. Cuanto de él sabemos se nos ha transmitido a través de los apuntes escolares de sus alumnos.

Su *Comentario a las Categorías* nos ha llegado por una doble vía, la de un discípulo anónimo, que dice haberlos recogido de su propia boca, es decir, de sus clases, y la edición de Juan Philopponos. Este parece basarse, en numerosos pasajes, en la versión, más corta, del primero. *Kategorein* significa acusar ante el juez y, en sentido lógico, predicar. En ese contexto, por categoría se entiende un predicado que se atribuye a un sujeto. Las categorías tienen en Aristóteles un doble sentido, lógico y ontológico. En su significado lógico, designan una clasificación de conceptos; en su sentido ontológico, indican una catalogación de los modos de ser o de las diversas determinaciones que afectan al individuo. La doctrina aristotélica de las categorías se enfrenta al dualismo platónico. A los dos mundos distintos de su maestro, el físico y el ideal, opone Aristóteles dos modos distintos de ser: uno, el ontológico, compuesto por individuos realmente existentes; y otro, el lógico, constituido por los conceptos elaborados por la actividad intelectiva. Ambos órdenes, el del ser y el del pensar, sin embargo, se corresponden, y, por tanto, también las categorías, cuyo número reduce a diez: sustancia y accidente (cantidad, cualidad, relación, dónde, cuándo, situación, posesión, acción y pasión). Ammonio acuña la estructura del comentario. Se parte de un pasaje o *lemma* de la obra fuente y se examina desde cada ángulo. A veces, el asunto general se analiza primero y, luego, los detalles del texto. Si procede, se acomete la resolución de problemas o *aporiai* planteadas.



2. Serpiente venenosa, del Supplément grec 247*, folio 13*

El comentario a la *Isagogé* de Porfirio, recogido por un discípulo anónimo, se desenvuelve en un contexto neoplatónico. Se inscribe en el *curriculum platonicum*, que constaba de dos ciclos: en el primero se abordaban los *Diálogos*, sistematizados por Porfirio en el siglo III; en el segundo se abarcaban la física y teología del *Timeo* y *Parménides*. Tras el curso platónico se impartía el *curriculum aristotelicum*, de las obras lógicas a la física. Para comprender las *Categorías*, el alumno debía familiarizarse primero con la "introducción" a las mismas (*Isagogé*) de Porfirio. En su extensa glosa, Ammonio expone, entre otras, la definición de ciencia, que delimita en una doble perspectiva, según su contenido y según el fin que se propone. Por su contenido, la medicina se ocupa del cuerpo humano; por su fin, de la curación.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Repeluciclos

Un virus denominado "repeluciclo" causa, dicen, no pocas enfermedades. Los bioquímicos han establecido que adopta una forma cilíndrica; no han podido todavía medir su perímetro. He aquí lo que saben: hay filamentos de cinco longitudes distintas, a las que aluden mediante colores. Los de color aguamarina miden 4 unidades; los blaos, o azures de la heráldica, 5; los carmesíes, 6; los dorados, 7; y los esmeralda, 8. El cilindro está formado por aros apilados; cada aro, por filamentos montados a tope (extremo contra extremo).

Convendremos en que el eje del cilindro sea vertical. Han sido identificadas las siguientes restricciones: Si X e Y son aros, e Y se encuentra inmediatamente sobre X, o en el segundo piso sobre X, o en el tercero, toda recta vertical trazada sobre el cilindro (es decir, toda generatriz) ha de cortar a X y a Y en colores *diferentes*. Por así decirlo, los iguales se repelen hasta hallarse a distancia tres. Todos los anillos han de ser, claro está, circunferencias de igual tamaño. ¿Cuánto medirá la menor de las posibles?

Vemos al pie un problema preliminar: supongamos que los iguales se repelen a distancia de 2, y que los únicos filamentos sean aguamarina, blao, carmesí y dorado. ¿Cuál sería el valor mínimo del perímetro?

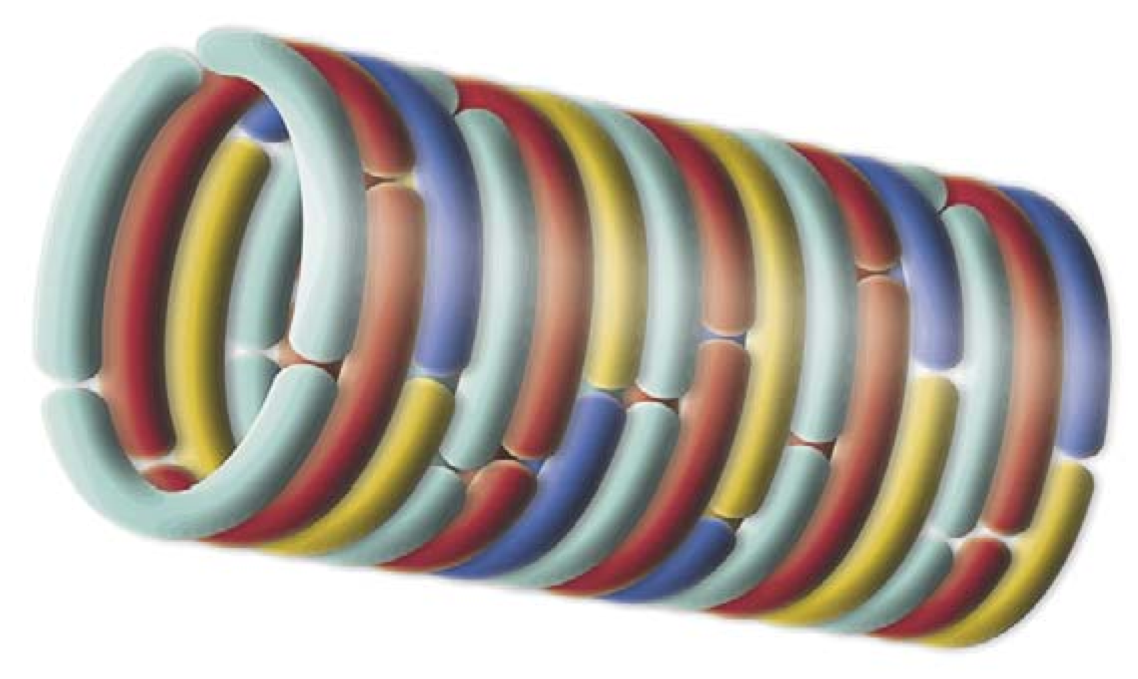
Una cuestión más. Otro grupo ha descubierto un segundo virus, llamado minirrepeluciclo. He aquí lo que los investigadores saben: cada filamento tiene una longitud de 2 o más; los filamentos pueden ser de cinco tamaños, la circunferencia mide 7 y la repulsión entre iguales llega a la distancia 3. ¿Cómo es posible?

Solución del problema del mes pasado:

El demandante puede maximizar su indemnización reclamando 10 millones, el extremo superior de las posibles considerado por el juez, incluso aunque sospeche que la demandada haya conocido la petición. Se puede ver una explicación más completa en www.investigacionyciencia.es.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



SARA CHEN